

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

ŘEZNÉ SÍLY PŘI VRTÁNÍ VLÁKNOVĚ VYZTUŽENÝCH KOMPOZITŮ

CUTTING FORCES WHEN DRILLING FIBRE REINFORCED COMPOSITES

DIPLOMOVÁ PRÁCE
MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ REŽNÝ

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

doc. Ing. ANTON HUMÁR, CSc.

BRNO 2009

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav strojírenské technologie

Akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Tomáš Režný

který/která studuje v **magisterském navazujícím studijním programu**

obor: **Strojírenská technologie a průmyslový management (2303T005)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Řezné síly při vrtání vláknově vyztužených kompozitů

v anglickém jazyce:

Cutting forces when drilling fibre reinforced composites

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Práce je zaměřena na vláknově vyztužené kompozitní materiály z hlediska jejich rozdělení, označování, užití, současných trendů vývoje a výroby a možností efektivního obrábění. Cílem práce je komplexní zpracování získaných technických poznatků a zejména vyhodnocení technologických zkoušek vrtání kompozitu s polyesterovou matricí, vyztuženého skelnými vlákny, z hlediska vlivu obráběného materiálu, pracovních podmínek a nástroje a jeho opotřebení na hodnoty posuvové síly a krouticího momentu.

Cíle diplomové práce:

1. Obecný rozbor problematiky řezných sil při vrtání
2. Experimentální zařízení pro měření řezných sil - obecná charakteristika (principy, konstrukce a vlastnosti dynamometrů)
3. Kompozitní materiály a jejich charakteristika (struktura, výroba, fyzikálně mechanické vlastnosti, užití)
4. Vyhodnocení experimentálně naměřených hodnot posuvové síly F_f a krouticího momentu M_k při vrtání šroubovitým vrtákem
5. Technicko - ekonomické hodnocení

Seznam odborné literatury:

1. AGARWAL, B.D., BROUTMAN, L.J. Vláknové kompozity. Praha: SNTL – Nakladatelství technické literatury, 1987. 294 s.
2. DOEBELIN, E.O. Measurement Systems - Application and Design. USA: Mc Graw - Hill Book Company, 1975. 772 s.
3. GRAYSON M. Encyclopedia of Composite Materials and Components. New York, USA: A Wiley-Interscience publication, 1983. ISBN 0-471-87357-8.
4. HUMÁR, A., PÍŠKA, M., JANSKÝ, M., PODRÁBSKÝ, T., ČECH, V. Technologie zpracování nových kompozitních materiálů tuzemské výroby. Závěrečná zpráva grantového projektu GAČR č.101/98/0855. Brno: Ústav strojírenské technologie VUT-FSI, prosinec 2000. 154 s.
5. CHLADIL, J., HUMÁR, A. Teorie obrábění - Příklady a cvičení. Brno: Nakladatelství VUT, 1991. 64 s.
6. JAHANMIR, S. Machining of ceramics and composites. New York, USA: Marcel Dekker, Inc. 1998. 704 p. ISBN 0-8247-0178-X.
7. MURPHY, J. The Reinforced Plastics Handbook. Second Edition. Oxford, United Kingdom: Elsevier Science Ltd., 1998. 674 p. ISBN 1 85617 348 8.
8. REINHART, T.J.: Engineering Materials Handbook, Volume 1 - COMPOSITES. Fourth printing. Metals Park, Ohio, USA: ASM International, 1993, 983 p. ISBN 0-87170-279-7.
9. Technické materiály a prospekty firem Brüel & Kjaer, Hottinger, Kistler.

Vedoucí diplomové práce: doc. Ing. Anton Humár, CSc.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2008/2009.

V Brně, dne 18.11.2008

L.S.

doc. Ing. Miroslav Píška, CSc.
Ředitel ústavu

doc. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

Tato diplomová práce je zaměřena na vláknově vyztužené kompozitní materiály z hlediska jejich rozdělení, označování, užití, vývoje a výroby. Cílem práce je komplexní zpracování získaných technických poznatků a vyhodnocení technologických zkoušek vrtání kompozitu vyztuženého skelnými vlákny a prepregu z hlediska vlivu obráběného materiálu, pracovních podmínek a nástroje a jeho opotřebení na hodnoty posuvové síly a krouticího momentu.

Klíčová slova

kompozitní materiály, matrice, vlákna, vrtání, vrták, řezné síly, opotřebení nástroje

ABSTRACT

This master's thesis is focused on fibre-filled composite materials, their distribution, labeling, usage, development and production. The aim of this work is complex processing of acquired technical knowledge, and evaluation of technological rehearsals of drilling composite materials which are reinforced by glass fiber and prepreg in terms of the impact of the machined material, working conditions and the tool, and its wear to the feed force value and torque.

Key words

composite materials, matrix, fibres, drilling, drills, cutting forces, tool wear

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

REŽNÝ, Tomáš. *Řezné síly při vrtání vláknově vyztužených kompozitů: Diplomová práce*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2009. 63s., 3 přílohy. Vedoucí práce doc. Ing. Anton Humár, CSc.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Řezné síly při vrtání vláknově vyztužených kompozitů vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

.....
Jméno a příjmení diplomanta

Poděkování

Děkuji tímto doc. Ing. Antonu Humárovi CSc. za cenné připomínky a rady při vypracování diplomové práce.

OBSAH

Abstrakt	3
Prohlášení	4
Poděkování	5
Obsah	6
Úvod	7
1 Kompozitní materiály	8
1.1 Matrice	9
1.1.1 Kovové matrice	10
1.1.2 Polymerní matrice	10
1.1.3 Keramické matrice	12
1.2 Vyztužující vlákna	13
1.2.1 Přírodní vlákna	13
1.2.2 Skelná vlákna	14
1.2.3 Kovová vlákna	15
1.2.4 Polymerní vlákna	15
1.2.5 Keramická vlákna	16
1.2.6 Whiskery	17
1.3 Výroba kompozitů	17
1.3.1 Ruční kladení	18
1.3.2 Stříkání	19
1.3.3 Objemové lisování (BMC)	21
1.3.4 Kontinuální lisování tlustostěnných dílců (TMC)	22
1.3.5 Lisování tenkostěnných dílců (SMC)	22
1.3.6 Lisování s přenosem pryskyřice (RTM)	23
1.3.7 Vstřikovací lisování (IM)	24
1.3.8 Navíjení	24
1.3.9 Odstředivé lití	25
1.3.10 Tažení (pultruze)	25
1.3.11 Výroba prepregů	27
1.4 Využití kompozitních materiálů v průmyslové výrobě	29
2 Obecný rozbor problematiky řezných sil při vrtání	31
3 Experimentální zařízení pro měření řezných sil	34
3.1 Indukční snímače sil	34
3.2 Magnetoelastické snímače sil	35
3.3 Magnetoanizotropní snímače sil	35
3.4 Kapacitní snímače sil	36
3.5 Tenzometrické odporové snímače sil	37
3.6 Piezoelektrické snímače sil	37
3.7 Piezoelektrické dynamometry	38
4 Vyhodnocení experimentálně naměřených hodnot	40
4.1 Problematika vrtání vláknově vyztužených kompozitů	40
4.2 Problémy při obrábění	40
4.3 Vyhodnocení naměřených hodnot řezných sil	41
4.3.1 Rozbor silového namáhání vrtáků - PREPREG	45
4.3.2 Rozbor silového namáhání vrtáků - KOMPOZIT	48
5 Technicko - ekonomické hodnocení	55
Závěr	58
Seznam použitých zdrojů	59
Seznam použitých zkratk a symbolů	61
Seznam příloh	62

ÚVOD

V současné době je kladen velký důraz na materiály používané ve strojírenství a průmyslu obecně. Požadavky na funkční vlastnosti jednotlivých materiálů a také zvyšující se nároky na ně, nutí stále k dalšímu vývoji. Dříve používané kovové materiály jsou stále častěji nahrazovány materiály, které mají lepší mechanické vlastnosti, např. pevnost, tuhost, tažnost nebo vysokoteplotní odolnost. Výzkum a vývoj těchto materiálů umožňuje stále větší a větší uplatnění nejen ve strojírenství, ale i v jiných odvětvích.

Kompozitní, znamená skládající se z několika částí. Už historický vývoj těchto materiálů, který začíná někdy v období starověkého Egypta, kde se lepily luky z více dřevěných kusů vypovídá o tom, že se nejedná o výrobní technologie, která je využívána až v dnešní době. Ovšem tehdy se nejednalo o kompozit v pravém slova smyslu, jak ho známe v dnes. Čím více se lidská společnost rozvíjí, tím větší klade požadavky na strojírenské výrobky a zařízení, která pro svůj život nezbytně potřebuje. Jedná se například o požadavek na snížení hmotnosti, zvýšení životnosti v korozních prostředích nebo o ekonomicky a ekologicky přijatelnou výrobní technologii.

V současné době, kdy se zásoby nerostných surovin tenčí je důležité, aby výroba podpořená vědou a výzkumem nalézala nové materiály, které nejsou založené na nerostném bohatství. Z tohoto pohledu jsou kompozitní materiály ideálním řešením. Samozřejmě nejsou využitelné vždy, ale jejich užití se značně rozšiřuje.

Zvláště důležitým faktorem v současnosti je ekologie. Proto jsou skelná vlákna nahrazována vlákny přírodními (len, sláma, konopí). Přírodní vlákna mají minimální abrazivní účinky což napomáhá k delší životnosti obráběcích nástrojů a tím i ke snižování nákladů spojených s výrobou. Nevýhodou je však jejich menší rozměrová stabilita a navlhavost. Vývoj těchto vláken ovšem směřuje k tomu, že při využití nových vědních oborů budou mít stejné, ne-li lepší vlastnosti jako vlákna skelná nebo aramidová.

Největší význam mají kompozitní materiály v leteckém průmyslu, automobilovém průmyslu a při výrobě plavidel. Ve stále větší míře jsou však využívány i při stavbách chemických a energetických zařízení (komponenty čerpadel).

Kompozitním materiálům patří díky jejich specifickým vlastnostem budoucnost. To naznačuje již dnešní doba, kdy jsou úspěšně realizovány a zhotovovány výrobky z těchto materiálů. Hledání nových výrobních postupů, technologií a také kompozitních struktur, které by ještě více rozšířily použitelnost kompozitních materiálů, je ale otázkou příštích několika let.

1 KOMPOZITNÍ MATERIÁLY

Jedná se o skupinu materiálů, které se skládají z jedné nebo několika nespojitých fází, ponořených ve fázi spojitě. Nejčastěji používaným typem kompozitního materiálu je houževnatá matrice (pojivo), která je zpevněna vysokopevnými vlákny nebo tvrdými částicemi určité velikosti (výztuž). Vlastnosti kompozitních materiálů jsou značně ovlivněny vlastnostmi jejich materiálových složek.¹

Významný vliv na výsledné vlastnosti tak má několik faktorů. V první řadě je to koncentrace nebo-li příspěvek určité složky k vlastnostem celého kompozitu. Koncentrace je všeobecně považována za nejdůležitější parametr ovlivňující vlastnosti kompozitu.

Pro stanovení vlastností kompozitu je rovněž velmi důležitá koncentrace složek a homogenita systému. Tu nám udává koncentrační distribuce, určuje rozsah, ve kterém se může reprezentativní objem lišit ve fyzikálních a mechanických vlastnostech od průměrných vlastností jeho složek. Pokud není materiál homogenní, může to mít nepříznivý vliv na jeho výslednou pevnost, tzn. vznik lomu v místě s nejmenší pevností.

Také tvar jednotlivých částic nespojitě fáze, které bývají často pro jednodušší představu uvažovány jako koule nebo válec jsou pro dobré vlastnosti kompozitů důležité. Spolu s objemovým podílem určují mezifázový povrch, jenž má významnou roli při určování rozsahu vzájemného působení mezi maticí a výztuží.

Orientace vyztužení je dalším faktorem, který ovlivňuje vlastnosti materiálu. Mají-li vyztužovací částice tvar s rozměry ve všech směrech přibližně stejně velký, chová se kompozit téměř jako izotropní materiál. Nejinak je tomu i v případě, že jsou rozměry částic vyztužovací fáze různě velké a náhodně uspořádané. Pokud však bude převládat v tomto uspořádání jeden směr, může dojít až k anizotropii. V kompozitech vyztužených spojitými vlákny může být ovšem anizotropie žádoucí, jelikož umožňuje vytvářet velmi lehké a pevné konstrukce, odolávající namáhání ve směru nejlepších mechanických vlastností. Proto se kompozitní materiály využívají v letectví a kosmonautice.²

Vzhledem k tomu, že matrice přenáší vnější zatížení na vlákna a omezuje šíření trhlin z porušených vláken je důležité, aby materiál, ze kterého je matrice vyrobena, byl pokud možno houževnatý a tvárný. To napomáhá k celkově větší pevnosti vyráběného dílce.

Vyztužující vlákna musí splňovat řadu kritérií. Mezi ně patří vysoká pevnost, tuhost, lehkost a v neposlední řadě také vysoká teplota tání a vysoká hodnota poměru R_m/ρ (měrné pevnosti) a poměru E/ρ (měrného modulu pružnosti v tahu). Pevnost vláken značně ovlivňuje výslednou pevnost kompozitu. Důležitou roli hraje také délka vyztužujících vláken tzv. aspektní poměr. Dlouhá vlákna s vysokou hodnotou aspektního poměru mají lepší vlastnosti, než vlákna krátká. Výroba těchto kompozitů je však obtížná - zvláště pak ukládání vláken v matici. Krátká vlákna jsou naopak snadněji vyrobitelná, ale vlastnosti jsou poněkud horší.

Objemové množství vláken má rovněž významný vliv na chování kompozitů. Se zvyšujícím se množstvím vláken vzrůstá i jejich pevnost a tuhost. Největší objemový podíl cca 80% je omezen požadavkem, aby jednotlivá vlákna byla vzájemně dobře oddělena materiálem matrice.

Další důležitý faktor ovlivňující vlastnosti a chování kompozitů je fázové rozhraní. To slouží k přenosu zatížení z matrice na vlákna. Pevnost je tedy dána kvalitou mezifázového rozhraní - dokonalým adhezním spojením. Pokud je vazba dostatečně silná, nehrozí porušení a šíření mikrotrhlinek podél vláken. Při mechanickém zatěžování kompozitů vznikají na fázovém rozhraní zbytková napětí. Ta jsou důsledkem výrobního procesu nebo napětí, vznikajícího v okolí výrobních vad v kompozitu. Tato napětí jsou způsobena dvěma příčinami. Buď rozdílem v teplotní roztažnosti složek kompozitu nebo rozdílem mezi výrobní a provozní teplotou. Výrobní vady - póry, dutiny nebo vruby působí v kompozitech jako koncentrátoři napětí.³



Obr. 1.1 Fázové rozhraní⁴

Shrnutí fyzikálně mechanických vlastností vláknových kompozitů:⁵

- nekorozivnost,
- snadná montáž,
- elektrická nevodivost,
- nízká měrná hmotnost,
- nízká tepelná vodivost,
- vysoká rozměrová stálost,
- dobré mechanické vlastnosti,
- minimální dlouhodobá údržba,
- flexibilita tvarů, povrchů a barev,
- nulový útlum elektromagnetických vln.

1.1 Matrice

Úlohou matrice je přenos vnějšího zatížení na zpevňující fázi. Rovněž má za úkol chránit zpevňující fázi před okolními vlivy. V porovnání se zpevňující fází má zpravidla nižší pevnostní vlastnosti a větší plasticitu. Je požadována dobrá soudržnost matrice s materiálem zpevňující fáze (dokonalá smáčivost bez chemické reakce mezi matricí a zpevňující fází) a často také nízká hmotnost materiálu, ze kterého je matrice vyrobena. Spojuje jednotlivé části zpevňující fáze a brání křehkému porušení složeného materiálu.^{1,3,6}

Základní rozdělení kompozitních materiálů dle matrice:⁵

- kovová (zejména hliník a jeho slitiny),
- polymerní,
 - termoplasty (polypropyleny, polyamidy, polykarbonáty aj.),
 - reaktoplasty (polyestery, epoxidy, polyimidy aj.),
 - kaučuky (kordy),
- keramická.

1.1.1 Kovové matrice

Hlavní předností těchto matic na rozdíl od matic polymerních je jejich větší pevnost, tuhost a zejména houževnatost. Splňují rovněž podmínky dobré elektrické a tepelné vodivosti, smykové pevnosti a tvárnosti (zpomalující rozvoj trhlin), odolnost opotřebení, možnost povlakování a spojování. Nejběžnější z kovových matic je hliník a jeho slitiny, titan a jeho slitiny a některé slitiny na bázi niklu.^{2,6}

Tab.1.1 Vlastnosti kovových matic³

Matrice		Měrná hmotnost ρ [kg.m ⁻³]	Pevnost v tahu R_m [GPa]	Modul pružnosti v tahu E [GPa]
na bázi	slitina			
Al	AlCu ₄ Mg	2770	0,490	70
	AlZn ₄ Mg ₁	2720	0,380	70
	AlMgSi	2700	0,320	70
Mg	MgLi ₈	1500	0,220	40
	MgZn ₆ Zr	1800	0,345	45
	MgAl ₃ Zn	1800	0,427	45
Ti	TiAl ₆ V ₄	4430	0,910	112
Ni	Hastelloy X	8950	0,850	240
	Superslitiny	8300	1,500	192

1.1.2 Polymerní matrice

Ve výrobě kompozitů mají své nezastupitelné místo. Jsou nejstarší a nejčastěji používané. Ve srovnání s kovy mají menší hmotnost, vysokou měrnou pevnost, nevyžadují povrchové úpravy, tlumí kmity, mají nízkou elektrickou a tepelnou vodivost a jsou korozivzdorné.

Tab.1.2 Používané termoplasty³

Matrice		Měrná hmotnost ρ [kg.m ⁻³]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Modul pruž- nosti v tahu E [MPa]
název				
termoplast	zkratka			
polyamid 6	PA6	1130	70-85	1200-1400
polyamid 66	PA66	1140	77-84	1600-2000
polyamid 12	PA12	1020	45-60	1500-1800
polyimid	PI	1420	75-95	3200
polykarbonát	PC	1200	56-72	2000-2400
polyetereterketon	PEEK	1320	70-103	2250
polystyren	PS	1050	36-65	2275-3275

Tab.1.3 Používané reaktoplasty³

Matrice název		Měrná hmotnost ρ [kg.m ⁻³]	Pevnost v tahu R_m [MPa]	Modul pruž- nosti v tahu E [MPa]
reaktoplast	zkratka			
polyimidová pryskyřice	PI	1420	80	3000
fenolformaldehydová pryskyřice	PF	1127	40-60	3500-4200
melaminoformaldehydová pryskyřice	MF	1500	45-65	7000-9000

Podle vlastností a způsobu výroby rozlišujeme polymery na: termoplasty a reaktoplasty.

Termoplasty:

Jsou tuhé látky, které mají většinou větší chemickou odolnost a houževnatost než reaktoplasty. Při zvýšení teploty měknou a po ochlazení opět přechází do tuhého stavu. Nejčastěji používanými termoplasty jsou polyamidy (nylon), polyetylen, polypropylen, polykarbonát a tavitelné kopolymery tetrafluoretylenu.

Charakteristickým strukturním znakem termoplastů jsou velmi dlouhé molekuly vytvořené opakováním stejných strukturních jednotek (až několik milionů). Jednotlivé molekuly nejsou vzájemně provázány žádnými chemickými vazbami. Jejich vzájemné interakce, které zaručují kohezní pevnost polymerního tělesa jsou většinou slabé, např. van der Waalsovy interakce nebo vodíkové můstky atd.^{3,7} Struktura termoplastu je znázorněna na obr. 1.2.

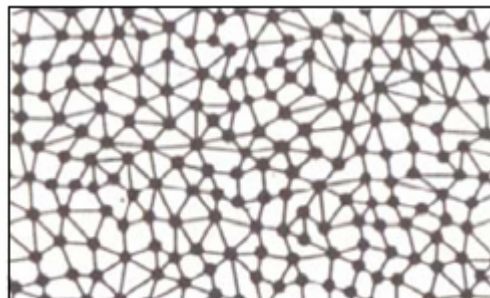
Reaktoplasty:

Bývají rovněž nazývány termosety. Jedná se o viskózní tekutinu s konzistencí řídkého medu tvořenou relativně malými molekulami, které jsou vytvrzeny chemickou reakcí po dodání katalyzátoru a iniciátoru. Při vytvrzování těchto materiálů dochází ke vzniku chemických vazeb mezi jednotlivými molekulami. Na rozdíl od termoplastů, které tvoří dlouhé lineární molekuly, vzniká u reaktoplastů třídimenzionální polymerní síť s různou hustotou „ok“. Vytvrzování probíhá buď za pokojové teploty nebo za zvýšené teploty. Reaktoplasty zůstávají v tuhé fázi i po zahřátí, což zvyšuje jejich odolnost proti creepu a vysokým teplotám, avšak na druhé straně se zvyšuje jejich křehkost a omezuje recyklovatelnost.^{1,3,7}

Mezi reaktoplasty patří například:⁸

- epoxidy (EP) - jedná se o nejvšestrannější reaktoplasty. Mají dobrou houževnatost (v porovnání s jinými reaktoplasty), odolnost proti únavě a tečení, dobré elektrické vlastnosti a malé smrštění při vytvrzování. Vytvrzovací reakce u epoxidů probíhá pozvolna stupňovitě, takže nevznikají problémy s exotermickou povahou vytvrzovacího procesu. Epoxidové pryskyřice vyžadují výrazně vyšší obsah vláken, než např. polyesterové nebo vinylesterové pryskyřice.
- polyestery (UP) - patří k nejpoužívanějším pryskyřicím. Vhodnou volbou vytvrzovacího systému lze dosáhnout širokého rozmezí doby gelace a doby vytvrzení, proto je lze využívat pro všechny technologie.

- vinylestery (VE) - jsou to nenasyčené estery epoxidových pryskyřic. Kompozity s vinylesterovými pryskyřicemi mají větší mezilaminární smykovou pevnost a také větší houževnatost než kompozity s nenasyčenými polyesterem. Rovněž odolávají korozi a proto se velmi často používají jako krycí vrstva kompozitních výrobků.

Obr. 1.2 Struktura termoplastu⁹Obr. 1.3 Struktura reaktoplastu⁹

1.1.3 Keramické matrice

Jsou významné pro použití při vysokých teplotách pro svou vysokou tvrdost a pevnost v tlaku, odolnost vůči creepu, malou tepelnou vodivost, vysokou teplotu tání, elektrickou nevodivost a dobrou chemickou odolnost. Hlavní nevýhodou těchto materiálů je značná křehkost, nesnadná obrobitelnost a velká citlivost na vnitřní defekty. Pro tyto matrice se nejčastěji používají oxidy, karbidy nebo nitridy různých prvků, např. SiC (nejpoužívanější), Al_2O_3 , ZrO_2 , ThO_2 , UO_2 , mullit aj.^{1,3}

Tab.1.4 Vlastnosti keramických matic³

Druh matrice		Měrná hmotnost ρ [$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$]	Pevnost			Modul pružnosti v tahu E [GPa]
název	chemická značka		v tahu [MPa]	v tlaku [MPa]	v ohybu [MPa]	
oxid hlinitý	Al_2O_3	3300-4000	200	350-2000	280-400	350-420
nitrid křemíku	Si_3N_4	2500-3300	100-900	~3000	220-850	160-300
karbid křemíku	SiC	2200-3200	500	2000	300-550	280-400
grafit	C	2200	70-140	200-600	41,5	690
A - sklo	-	2480	-	3100	-	74

1.2 Vyztužující vlákna

V kompozitech se používají různé druhy vláken. Průřez vláken bývá zpravidla kruhový, jejich průměry se pohybují v širokém rozpětí: nad 10 mikrometrů - hrubá vlákna (B, TiB_2 , SiC), 1 až 10 mikrometrů - střední vlákna (uhlíková, skleněná), 0,1 až 10 mikrometrů - mikrovlákna (whiskery), až do průměru 100 nanometrů tzv. nanovlákna.¹⁰

Kompozity lze rozdělit podle tvaru a uspořádání zpevňujících vláken na:⁷

- **jednosměrné** (vlákna jsou orientována převážně v jednom směru):
 - krátkovláknové (poměr délka/průměr je < 100),
 - dlouhovláknové (délka/průměr je > 100 či kontinuální vlákna, tj. vlákna s délkou rovnou rozměrům celého dílce):
 - prepregy (nevytvrzenou pryskyřicí preimpregnované vrstvy vláken ve tvaru tenkých pásů různé šířky),
 - tažené profily (tyčovina),
- **mnohosměrné** (vlákna jsou náhodně nebo pravidelně orientována dvěma či více směry):
 - krátkovláknové (poměr délka/průměr je < 100),
 - dlouhovláknové (délka/průměr je > 100 či kontinuální vlákna, tj. vlákna s délkou rovnou rozměrům celého dílce):
 - prepregy (nevytvrzenou pryskyřicí preimpregnované vláknové rohože či tkaniny),
 - lamináty (střídání vrstev jednosměrných kompozitů s různými vzájemnými orientacemi výztuže),
 - lamináty s tkanou výztuží (vlákna jsou před prosycením pryskyřicí utkána běžnými nebo speciálními textilními technologiemi),
 - lamináty s netkanou výztuží (střídání vrstev vyztužujících rohoží, ve kterých jsou vlákna zpracována do roun, aniž by byla tkána),
 - tažené profily (komplikovanější tvary s kombinací vyztužujících vláken).

Základní rozdělení kompozitních materiálů dle vyztužujícího vlákna:⁷

- přírodní (bavlna, juta, celulóza aj.),
- anorganická (skelná, uhlíková, kovová, SiC aj.),
- organická (aramidy – Kevlar, polyimidy, UHMWPE aj.),
- whiskery.

1.2.1 Přírodní vlákna

Získávají se především z pěstovaných rostlin. Tato vlákna mohou mít překvapivě dobré vlastnosti. Základem těchto vláken je celulóza.

Přírodní vlákna se používají jako výztuž tvarových velkoplošných dílů pro interiéry osobních automobilů.¹⁰

Výhody použití přírodních vláken v termoplastech:¹¹

- levná výroba,
- úspora polymeru,
- recyklovatelný odpad,
- většina vláken je biodegradovatelná,

- použitím výztuže klesá cena výrobku,
- povrch výsledného výrobku má přírodní vzhled,
- vlákna nezpůsobují opotřebení zpracovatelských strojů.

Tab.1.5 Vlastnosti přírodních vláken¹¹

Vlákno	Hustota ρ [g/cm ³]	Modul pružnosti E [GPa]	Pevnost v tahu [GPa]	Mezní prodloužení [%]
bavlna	1,52	27	0,2-0,8	6-12
konopí	1,52	70	0,46	1,7
len	1,52	100	0,84	1,8
juta	1,3	60	0,442	2,0

1.2.2 Skelná vlákna

Velice často se používají na vyztužování polymerních matric. Dosahují poměrně vysoké pevnosti, mají však nízký modul pružnosti E a jsou křehká. Pevnost je dána průřezem vlákna, čím menší průřez, tím je vlákno pevnější - dochází ke zmenšování přirozených defektů.

Vyrábí se z různých typů sklovin. Při výrobě kompozitů se nejčastěji používají vlákna ze skloviny E nebo S. Sklo E se vyznačuje dobrými tvárnými vlastnostmi a vysokým elektrickým odporem. Má však slabou chemickou odolnost vůči kyselinám, ale dobře odolává vodě. Sklo S má vyšší pevnost v tahu a vyšší modul pružnosti ve srovnání s E-sklem. Tato vlákna se používají v letecké a raketové technice. Sklo C je chemicky odolné proti kyselinám, ale jeho mechanické vlastnosti nedosahují vlastností E skla. Sklo D má také horší mechanické vlastnosti než sklo E, ale používá se hlavně pro svou nízkou dielektrickou konstantu. Využívá se zejména v elektrotechnice a energetice.^{3,6,7,10}

Základní vlastnosti skelných vláken:⁷

- tuhost přibližně stejná, jako hliník,
- malá odolnost skelných vláken proti únavě,
- tepelná vodivost je o polovinu nižší než u oceli,
- tepelná roztažnost je méně než polovina tepelné roztažnosti oceli.

Tab.1.6 Vlastnosti skelných vláken³

Typy vláken	Vlastnosti		
	Měrná hmotnost ρ [kg.m ⁻³]	Pevnost v tahu R_m [GPa]	Modul pružnosti v tahu E [GPa]
A-sklo	2500	3,2	70
C-sklo	2490	3,1	69
D-sklo	2160	2,4	52
E-sklo	2540	3,4	72
M-sklo	2890	3,4	110
S-sklo	2480	4,8	85
křemenné	2200	7,0	73

Obr. 1.4 Skelná rohož¹²Obr. 1.5 E-sklo (plátno)¹²

1.2.3 Kovová vlákna

Nejčastěji se používají na vyztužování kovových matic. Náklady na jejich výrobu jsou poměrně nízké, ale z hlediska měrné hmotnosti už tak výhodné nejsou. Při zpevňování kovových matic o poměrně nízkém bodu tavení se nejčastěji používají ocelová vlákna z uhlíkových ocelí. Pro vyšší teploty se používají vlákna z oceli typu maraging (martenzitické stárnoucí oceli). Pro matrice ze žárupevných slitin se používá např. wolfram nebo molybden. Kompatibilita vlákna a matrice hraje hlavní roli při přípravě kompozitu kov – kov.

Další pozornost je zaměřena na aplikaci kovových skel, u nichž se dosahuje vysoké úrovně homogenity a také vysokých mechanických parametrů (pevnost 5000 až 8000 MPa).^{1,3,10}

Tab.1.7 Vlastnosti kovových vláken³

Druh vlákna	Měrná hmotnost ρ [kg.m ⁻³]	Pevnost v tahu R_m [GPa]	Modul pružnosti v tahu E [GPa]
Cr	7,40	1,0-4,0	353-424
Mo	10,20	2,41	358
ocel	7,80	2,8-4,14	200
Al	2,66	0,6	73
Ti slitiny	4,51	0,55-2,2	118
W	19,1	3,0	348

1.2.4 Polymerní vlákna

Tato vlákna jsou určena především pro polymerní matrice. K největším přednostem těchto vláken patří jejich malá hustota (okolo 1 g/cm³). Vlákna s malou hustotou a vysokou pevností v tahu mají velkou měrnou pevnost a naopak vlákna s malou hustotou, která jsou tuhá, mají velký měrný modul. Běžně používaná polymerní vlákna např. polyethylentereftalátová (PET) nebo polyamidová (PA6 a PA66) mají pevnost a hlavně modul pružnosti v tahu hluboko pod hodnotami skelných vláken. Nevýhodou všech polymerních vláken je citlivost k vyšším teplotám a jejich špatná smáčitelnost, zvláště ve vztahu k pryskyřicím.^{1,3,10,11}

Typickým moderním představitelem polymerních vláken je Kevlar. Mezi jeho základní vlastnosti patří:¹⁰

- pevnost kolem 2,8 GPa,
- má záporný koeficient teplotní roztažnosti,
- při dlouhodobém zahřívání nad 175°C vlákna degradují,
- vlákna degradují účinkem UV záření za přítomnosti kyslíku,
- vlákna jsou chemicky odolná, napadána jen silnými kyselinami,
- při hustotě 1,44 g/cm³ má vynikající pevnost - pětinasobek oceli,
- deformace při lomu jsou menší než u skla, ale větší než u grafitu.

Tab.1.8 Vlastnosti polymerních vláken³

Druh vlákna	Měrná hmotnost ρ [g.cm ⁻³]	Pevnost v tahu R_m [GPa]	Modul pružnosti v tahu E [GPa]
polyamid PA6	1,13	0,60	2,9-3,5
polyamid PA66	1,36	0,80	2,9
polyamid P12	1,02	0,45	1,6
kevlar (aramid PPTA)	1,44	3,45	68,6
twaron (aramid PPTA)	1,45	3,00	125
PBT (polybenzothiazol)	1,50	3,25	250,0

1.2.5 Keramická vlákna

Vyznačují se poměrně nízkou hmotností, vysokou tuhostí a vysokým modulem pružnosti E. Řadí se mezi ně především vlákna bórová, uhlíková a vlákna vyráběná z různých karbidů, nitridů a oxidů.

K dalším vlastnostem patří:¹⁰

- malá tepelná roztažnost,
- velká teplotní odolnost a stabilita,
- malá závislost pevnosti na teplotě,
- mají malou štihlou - jsou poměrně krátká,
- nižší hustota než u kovů a vyšší než u polymerů,
- použití v kompozitech s kovovou a keramickou maticí (vysoké teploty).

Tab.1.9 Vlastnosti keramických vláken³

Druh vláken	Měrná hmotnost ρ [g.cm ⁻³]	Pevnost v tahu R_m [GPa]	Modul pružnosti v tahu E [GPa]
Bórová	2,63	3,5	400
Bórsic	2,7	3,1	400
Uhlíková	1,9	3,7	350
Grafitová	2,15	2,1	720
SiC	3,3	3,3	420
Al ₂ O ₃ (safír)	3,15	2,08	380
ZrO ₂	4,84	2,07	344

1.2.6 Whiskery

Svémi vlastnostmi tato vlákna převyšují rámec ostatních zpevňujících fází. Jedná se monokrystaly (vláknité krystaly), které mají průměr okolo 1 μm a délky 3 až 4 mm. Mají uprostřed upevněnou šroubovou dislokaci, neschopnou skluzu při běžných velikostech zatížení. Mohou se vyrábět z řady látek za reakčních podmínek při vysokých teplotách a řízené rychlosti růstu monokrystalů.

Vyskytují se i přírodní whiskery některých keramik např. azbest. Vlastnosti závisí především na podmínkách růstu, dokonalosti povrchu a na průměru. Nejdůležitější vlastností whiskerů je vysoký modul pružnosti E .^{1,3,10}

Tab.1.10 Vlastnosti whiskerů³

Druh whiskerů		Měrná hmotnost ρ [$\text{g}\cdot\text{cm}^{-3}$]	Pevnost v tahu R_m [GPa]	Modul pružnosti v tahu E [GPa]
keramické	Al_2O_3	4000	15	470
	SiC	3200	21	840
	BeO	3000	7	720
	Si_3N_4	3100	19	380
kovové	Cr	7400	9	240
	Cu	8900	3	120
	Ni	9000	4	213
	Fe	7800	13	200

1.3 Výroba kompozitů

Způsobů výroby kompozitních dílů existuje celá řada. V současné době se používá několik způsobů výroby. Obecně lze říci, že tyto složené materiály lze vyrábět dvěma základními postupy. Je to výroba složených materiálů s matricí v tuhém nebo tekutém stavu. Volbu vhodné technologie ovlivňuje celá řada činitelů, např. druh zpevňujících fází a matrice, způsob použití kompozitů nebo přípustnost anizotropie pro dané zatížení apod.^{1,3,8}

Při výrobě kompozitních dílů je třeba zaručit následující podmínky:¹

- dobré spojení výztuže s matricí,
- jednoduchost a hospodárnost výroby,
- možnost tepelného zpracování po výrobě,
- možnost změny objemového množství výztuže,
- rovnoměrné uložení vyztužujících fází v objemu,
- u vláknových kompozitů možnost uložení vrstev s libovolnou orientací vláken.

Vedle dvou základních složek, pryskyřičné matrice a pojiva se při výrobě kompozitů používají také různé přísady, např. barevné pigmenty, stabilizátory, retardanty nebo proti působení UV záření, atd. tak, aby výsledný produkt měl požadované mechanické a fyzikální vlastnosti.

Mezi základní výrobní technologie vláknově vyztužených kompozitů patří:¹³

- otevřené (jednostranné) formování:
 - ruční kladení,
 - stříkání,
- uzavřené (oboustranné) lisování:
 - objemové lisování (BMC - Bulk Moulding Compounds),
 - kontinuální lisování tlustostěnných dílců (TMC - Thick Moulding Compounds),
 - lisování tenkostěnných dílců (SMC - Sheet Moulding Compounds):
 - kontinuální,
 - ve formě,
 - lisování s přenosem pryskyřice (RTM- Resin Transfer Moulding),
 - vstřikovací lisování,
- navíjení,
- odstředivé lití,
- tažení (pultruze),
- výroba prepregů.

1.3.1 Ruční kladení

Jedná se o nejstarší, nejjednodušší a dosud nejrozšířenější způsob výroby. Používá se zejména pro přípravu velkoplošných dílců, jak v kusové, tak i v malosériové výrobě (kryty strojů, lodní trupy, části letadel).

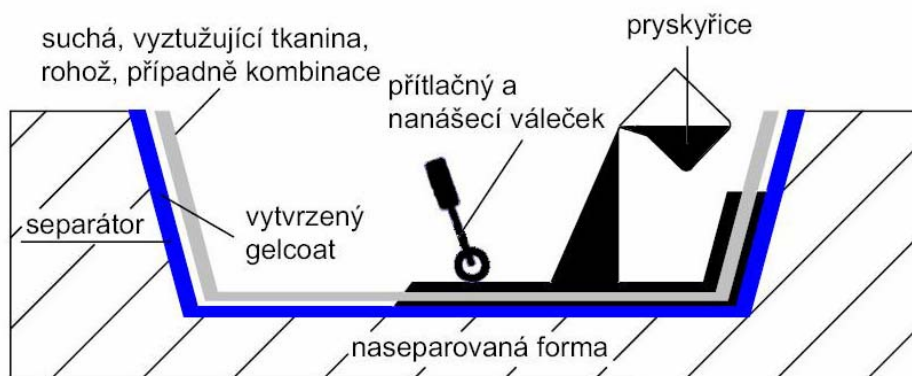
Tyto kompozitní dílce jsou vyráběny tak, že na kopyto, které má negativní tvar povrchu a je natřeno prostředkem, který zaručuje spolehlivé oddělení konečného výrobku je položena tenká povrchová fólie (např. jemná skelná tkanina nebo jiný materiál s hladkým povrchem), díky níž je zajištěna požadovaná jakost vnějšího povrchu vyráběného dílce. Na fólii jsou poté pokládány vyztužující rohože, na které se pak ručně nanese a rozetře tekutá pryskyřice. K tomuto se používá ruční váleček, který zaručí dokonalé proimpregnování výztuže. Další vrstvy jsou nanášeny postupně stejným způsobem, až do požadované tloušťky dílce. Poté je na laminovaný povrch položena vnitřní krycí fólie. Celý tento polotovár je pak umístěn na několik hodin do odděleného prostoru, kde dojde k vytvrzení pryskyřičné matrice. Proces vytvrzování lze urychlit zvýšením teploty okolního prostředí.^{13,14}

Výhody ručního kladení:¹³

- poměrně levný materiál,
- možnost vyrábět dílce libovolného tvaru,
- relativně nízké náklady na výrobní zařízení,
- široký rozsah volby vlastností kompozitu (podle druhu pryskyřice, tvaru a obsahu výztuže).

Nevýhody ručního kladení:¹³

- vysoké pracovní náklady,
- obtížné dodržování kvality,
- možnost vytvářet pouze jednostranné povrchy,
- negativní vliv na životní prostředí (uvolňování těkavých látek, nebezpečné odpady).

Obr. 1.6 Schéma ručního kladení¹⁴

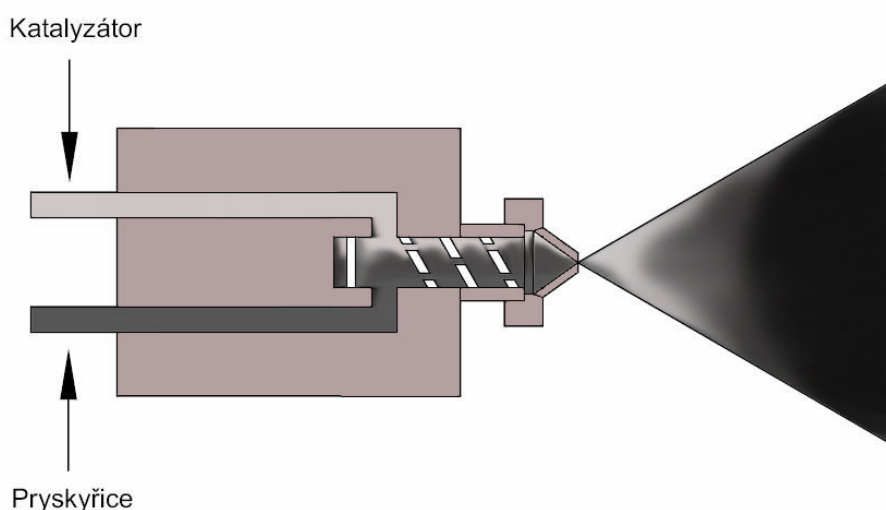
1.3.2 Stříkání

Podobně, jako ruční kladení, vyžaduje i tato výrobní metoda kopyto s negativním tvarem povrchu vyráběného dílce. Hlavní rozdíl mezi touto metodou a metodou ručního kladení spočívá v tom, že nanášení obou složek (pryskyřičné matrice i vyztužujícího materiálu) je pomocí stříkací pistole, která je buď ovládána ručně nebo průmyslovým robotem.

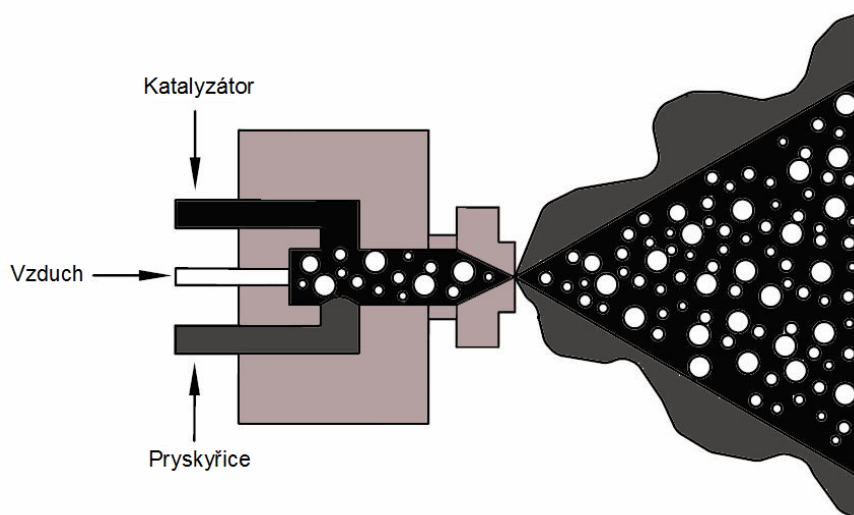
Tato metoda umožňuje lepší řízení celého procesu a to zejména s ohledem na přesné dávkování obou složek, což se projeví i v konečné kvalitě vyrobeného dílce. Vyztužující vlákna jsou do pistole posunována kontinuálně, speciálním zařízením drcena a smíchána s pryskyřicí.^{13,14}

Existují 3 způsoby míchání pryskyřice s katalyzátorem:

- Vnitřní míchání bez použitého tlakového vzduchu:¹³
 - snižuje odpad,
 - výrazně snižuje emisi styrenu,
 - zvyšuje pevnost laminátového dílce,
 - zaručuje důkladné promíchání materiálů.

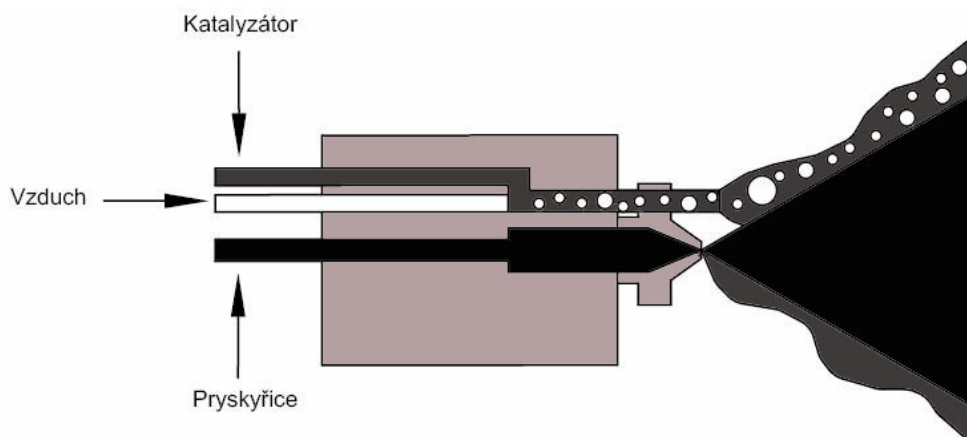
Obr. 1.7 Schéma vnitřního míchání bez použitého tlakového vzduchu¹³

- Vzduchový systém s vnitřním mícháním pryskyřice a katalyzátoru:¹³
 - lepší vlastnosti laminátového dílce,
 - zrychlení posuvu vyztužujících vláken,
 - rovnoměrné pokrytí kopyta díky turbulenci vháněného vzduchu.



Obr. 1.8 Schéma vzduchového systému s vnitřním mícháním pryskyřice a katalyzátoru¹³

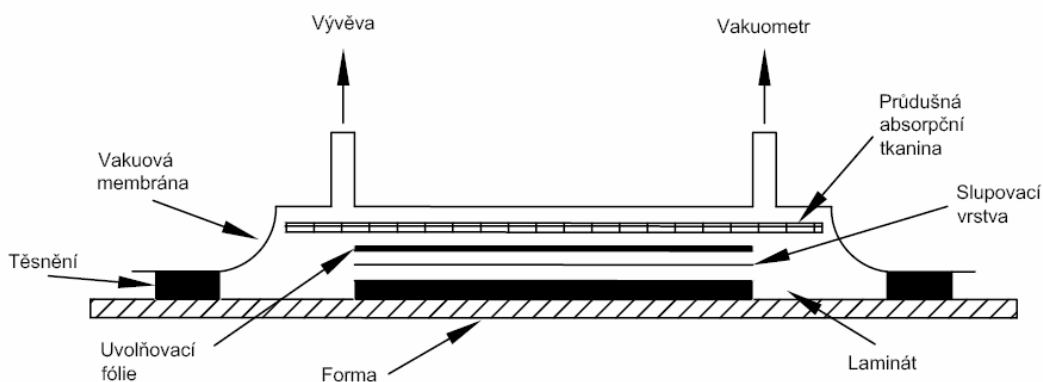
- Vzduchový systém s vnějším mícháním:¹³
 - vytvoření drobných kapek katalyzátoru a pryskyřice (smíchány vně stříkací pistole),
 - obtížnější dodržení požadovaného úhlu rozptylu paprsku (mohou nastat potíže s nerovnoměrností nanášení na kopyto).



Obr. 1.9 Schéma vzduchového systému s vnějším mícháním¹³

Pro zlepšení vlastností laminovaných kompozitů vyrobených metodou stříkání nebo ručního kladení se používá vytvrzování ve speciálním vaku nebo autoklávu za řízených tepelných podmínek. Z laminovaného dílce dojde za působení podtlaku k odstranění vzduchových bublin a tím selepší kvalita jeho vnitřního povrchu (povrch, který nebyl ve styku s kopytem).

Tento postup je velmi často používán zejména při výrobě kompozitních dílců pro letectví a kosmonautiku. K hlavním nevýhodám patří skutečnost, že nemůže být aplikován pro příliš velké dílce.¹³

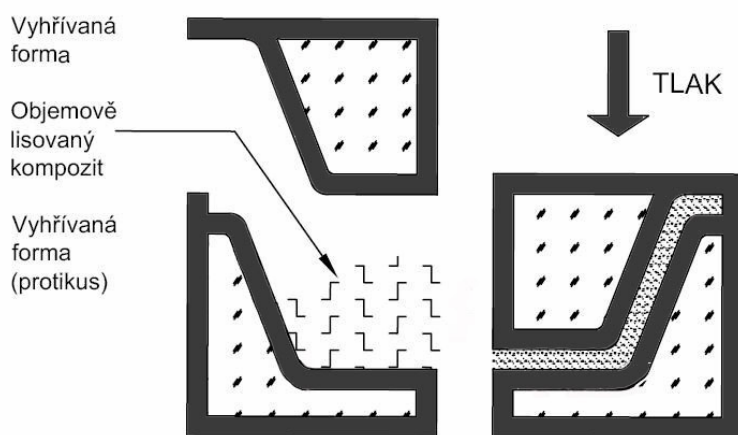


Obr. 1.10 Schéma vytvrzování ve speciálním vaku¹³

1.3.3 Objemové lisování (BMC)

Při tomto způsobu výroby je ze směsi drcených vyztužujících vláken, pryskyřice, plniv a přísad vytvořena pasta, která je pak umístěna do odpovídající formy. V této formě vznikne po vytvrzení hotový kompozitní dílec požadovaného tvaru a rozměrů.

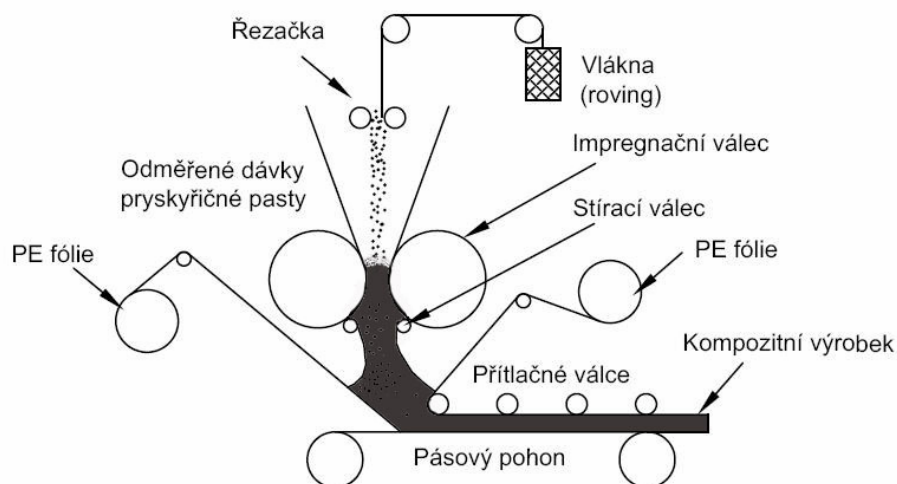
Forma je umístěna ve vertikálním lisu, kde jsou obě její části navzájem k sobě přitlačovány nižšími (nizkotlaké lisování) nebo vyššími tlaky (vysokotlaké lisování). Vytvrzování výsledné směsi probíhá za zvýšených teplot (realizováno ohřevem formy). Jestliže teplota nepřesáhne 80 °C, jde o tzv. studené lisování, při ohřevu na teploty 100 -160 °C jde o horké lisování. Po vytvrzení se forma otevře, obsluha vyjme hotový dílec a odstraní z něho výronky a otřepy. Při objemovém lisování lze dosáhnout velmi dobrou kvalitu povrchu kompozitních dílců, protože funkční povrchy obou částí formy jsou obvykle leštěny.¹³



Obr. 1.11 Schéma objemového lisování¹³

1.3.4 Kontinuální lisování tlustostěnných dílců (TMC)

Odměřené množství pryskyřičné matrice je pomocí impregnačních válců smícháváno se sekanými vyztužujícími vlákny a nanášeno mezi dvě polyetylenové fólie, které se odvíjejí ze zásobníkových rolí. Fólie a směs jsou pomocí pásového pohonu (nekonečný pás) vtahovány mezi přítlačné válce a pás, kde je kontinuálním způsobem lisován hotový kompozitní dílec požadované tloušťky s rovnoběžnými protilehlými povrchy.¹³

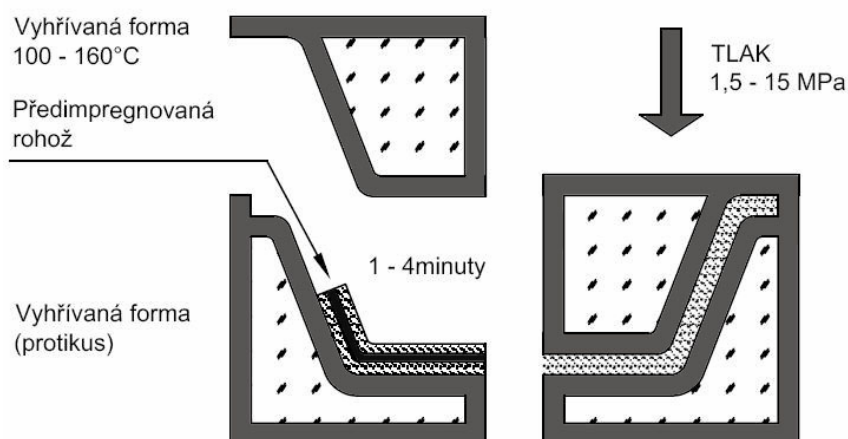


Obr. 1.12 Schéma kontinuálního lisování tlustostěnných dílců¹³

1.3.5 Lisování tenkostěnných dílců (SMC)

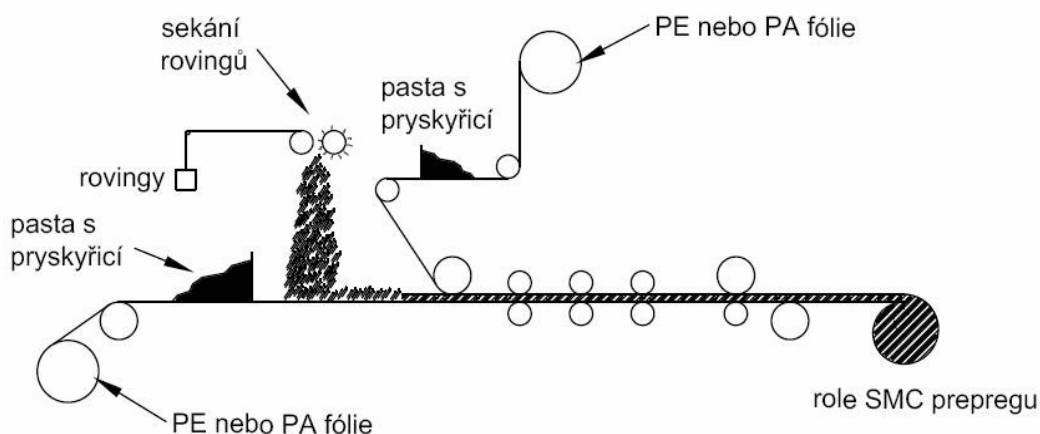
Tento způsob výroby může probíhat buď ve formách, kde se dají zhotovit výrobky složitějšího tvaru nebo kontinuálně - výroba nekonečných pásů.

- Lisování ve formě - do formy je umístěn předimpregnovaný vyztužující materiál. Po vložení formy do lisu za působení tepla a zatížení dojde po 1-4 minutách k vytvrzení pryskyřičné matrice.



Obr. 1.13 Schéma lisování tenkostěnných dílců ve formě¹³

- Kontinuální metoda - spočívá v nanášení pryskyřičné pasty a sekaných vyztužujících vláken mezi dvě fólie. Následuje lisování mezi dvěma lisovacími pásy. Takto připravovaný kompozit je navíc v podélném směru vyztužován spojitými vlákny (rovingem).¹³

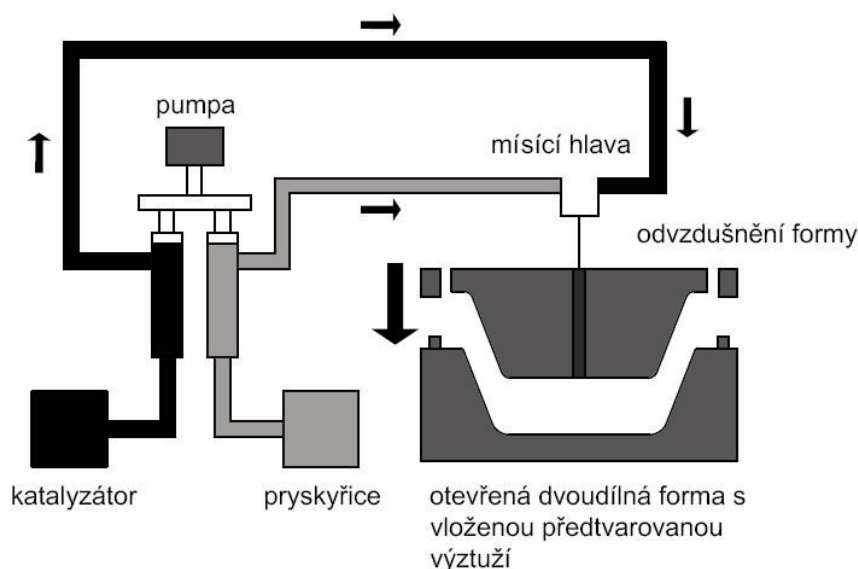


Obr. 1.14 Schéma lisování tenkostěnných dílců kontinuální metodou⁸

1.3.6 Lisování s přenosem pryskyřice (RTM)

Jedná o technologii s uzavřenou formou, při které se při použití polyesterových a vinylesterových pryskyřic do okolí neuvolňuje reaktivní rozpouštědlo.

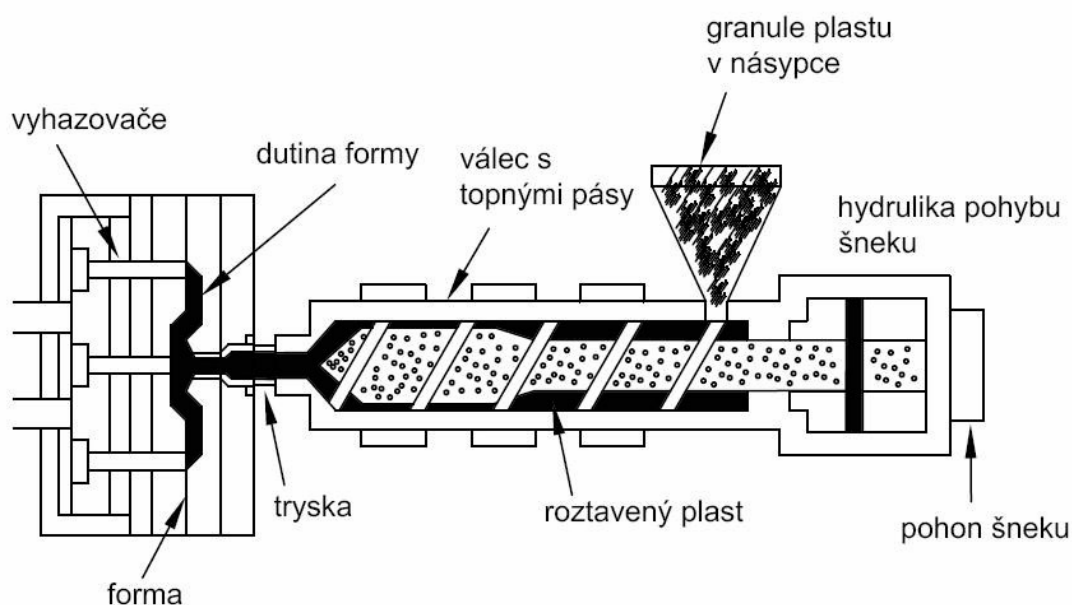
Pryskyřice a tvrdidlo jsou ohřáty na určitou teplotu a pak pomocí nízkotlakých čerpadel dopravovány do mísící hlavy, která je bezprostředně před injektáží směsi do formy. Výhodou této metody je, že povrchy dílu jsou hladké a rozměry jsou přesné. Jako výtěž se používají tkaniny nebo rohože. Vzhledem k vysoké produktivitě výroby je tato metoda využívána v automobilovém průmyslu např. spoilery.^{8,13}



Obr. 1.15 Schéma lisování s přenosem pryskyřice⁸

1.3.7 Vstřikovací lisování (IM)

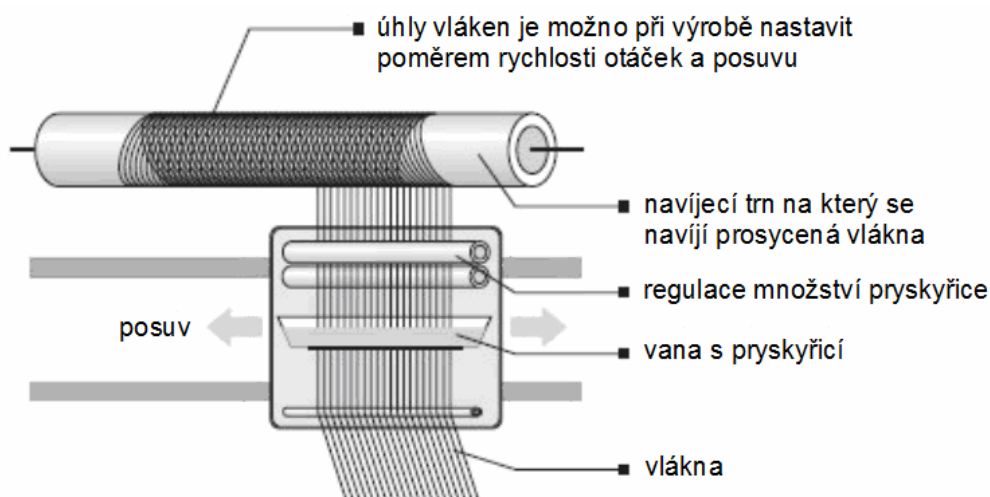
Odměřené množství surovin je pomocí násypky dopravováno k podávacímu šneku a přes ohřívací trysku a vtokový kanál vstřikováno do lisovací formy. Výhodou této formy je uzavřený systém, který minimálně ovlivňuje pracovní prostředí. Další výhodou je kvalitní oboustranný povrch vyrobených dílců, velmi dobrá reprodukovatelnost hmotnosti a vlastností dílců, široká možnost automatizace a nízké náklady. Hlavním nedostatkem této metody je však relativně nízká pevnost takto vylisovaného vláknově vyztuženého kompozitu, ve srovnání s teoretickou pevností jednotlivých složek. Dalším problémem je životnost podávacího šneku na výrobním zařízení, kde dochází v důsledku abrazivního účinku vyztužujících vláken k rychlému opotřebení funkčních ploch.¹³



Obr. 1.16 Schéma vstřikovacího lisování⁸

1.3.8 Navíjení

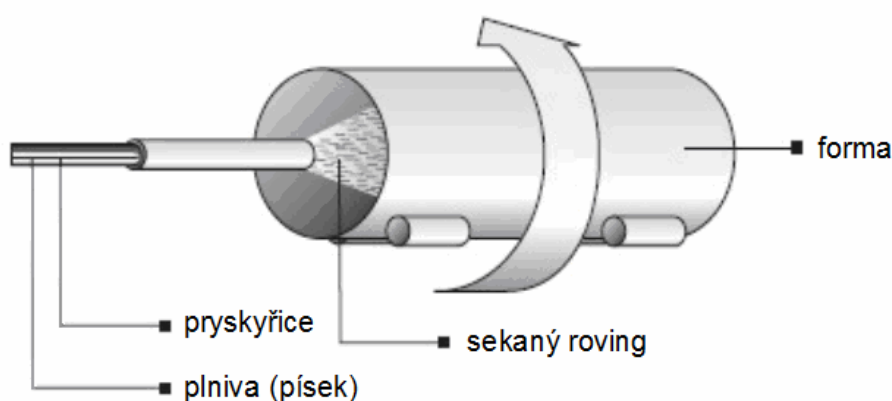
Metoda navíjení je nejčastěji používána pro výrobu dutých symetrických dílců zejména válcovitého tvaru např. trubky, nádrže nebo raketové motory. Na trn požadovaného tvaru rotující kolem své osy (obvykle v horizontální rovině) je kontinuálně navíjena výztuha (vlákna, rohože, atd.), která před uložením na trn prochází pryskyřičnou lázní. Po ukončení navíjení následuje vytvrzování dílce, které probíhá, buď přímo na trnu, nebo bez něj. Tato metoda umožňuje snadno měnit druhy vláken, hustotu a směr vinutí výztuhy. Navíjením lze zhotovovat dílce poměrně velkých rozměrů, např. palivové nádrže pro nákladní automobily a autobusy o průměru až 300 mm a délce 3 metry.^{8,13}

Obr. 1.17 Schéma navíjení⁸

1.3.9 Odstředivé lití

Tato výrobní metoda je založena na principu odstředivé síly. V duté rotující formě daného průměru se pohybuje v ose stříkací zařízení, které podle počítačem řízeného programu nanáší směs sekaných vláken, pryskyřice a různých plniv. Forma musí být zahřáta na teplotu vytvrzování. Následně dochází ke zhutňování nanesených vrstev, které vznikají rychlým otáčením formy.

Odstředivé lití má řadu výhod, např. minimum nástrojů, výrobní proces je snadno automatizovatelný, je možno dosáhnout poměrně dobrých povrchů na obou stranách výrobku a odpadovost je minimální. Nevýhodami jsou vysoká cena technologického zařízení a nutnost vyrobit formy, které jsou velmi přesně vybalancovány. Nejčastěji se touto metodou vyrábí trubky, velké skladovací nádoby, paraboly radarů atd.^{8,14}

Obr. 1.18 Schéma odstředivého lití¹⁴

1.3.10 Tažení (pultruze)

Touto technologií lze vyrábět velmi efektivně kontinuálním způsobem různé plné, duté i tvarové profily s vysokým obsahem výztuže (až 80%). Výztuže, nejčastěji skelné, ale i uhlíkové nebo jiné pramence prochází pryskyřič-

nou lázní a po prosycení jsou tvarovány do požadovaného průřezu. Zároveň je celý takto vzniklý kompozit vytvrzen v kontinuální vytvrzovací hlavě.^{7,8}

Technologickou jednotkou, která slouží pro výrobu tažených kompozitních profilů je pultruder. Jedná se prakticky o kompletní výrobní linku, kde na začátku vstupují do procesu vyztužující vlákna a na konci vystupuje hotový kompozitní profil požadovaného průřezu a délky.¹³

Pultruder se skládá z následujících částí:¹³

- zásobník výztuží a naváděcí systém,
- impregnační sekce a předtvarování,
- tvarovací a vytvrzovací hlava,
- tažná sekce,
- dělicí pila.

Výrobní kroky pultruze:⁷

- soustava vláken, rohoží a roun je tažena s předepsaným předpětím,
- výztuž je tažena do pryskyřičné lázně,
- vstup do předtvarovacího prostoru, tvarovací a vytvrzovací hlavy (v případě velké tloušťky stěn je potřeba modifikovat vytvrzování zapojením mikrovlnného předehřívacího zařízení),
- za vytvrzovací hlavou je tažné zařízení, které je nositelem pohybu celé linky,
- za tažným zařízením je pila, která automaticky řeže profil na požadovanou délku.

Největší výhody pultruze:¹⁴

- vysoká produktivita,
- vysoký stupeň automatizace,
- minimální nároky na lidskou práci,
- nekonečná délka vyrobeného profilu,
- prakticky neomezená variabilita tvaru průřezů,
- vysoká reprodukovatelnost fyzikálních vlastností.

Nevýhody pultruze:¹⁴

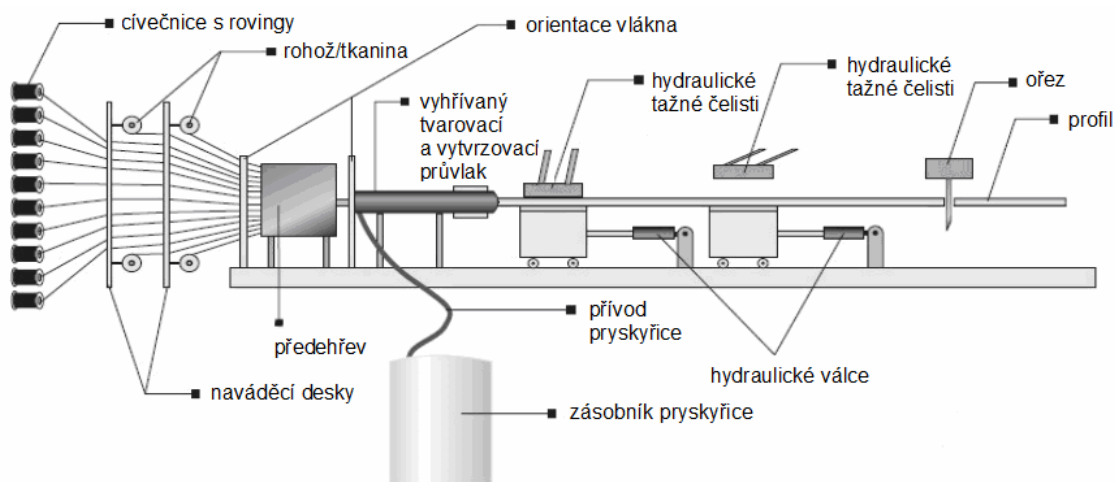
- relativně drahý provoz,
- nutnost velmi kvalitního řídicího systému,
- poměrně velké investiční náklady na pořízení technologie.

Materiály použité při pultruzi:¹⁴

- výztuže:
 - skelný roving,
 - povrchové rohože,
 - uhlíkové pramence,
 - tkané stuhly a pásy z různých vláken nebo rohože s těžko rozpustným pojivem.

- pojiva:¹⁴
 - pigmenty,
 - plniva (pro snížení hořlavosti),
 - pojiva obsahující vnitřní separátory,
 - aditiva pro zlepšení hladkosti povrchu a usnadňující probarvení,
 - nízkoviskozní polyesterové, vinylesterové nebo epoxidové pryskyřičné systémy vytvrzující rychle za zvýšených teplot (80 -160 °C).

Tato technologie je vhodná pro kontinuální výrobu profilů od velmi tenkých a jednoduchých (1 mm pásky pro vyztužení hokejek a lyží) až po velmi složité a rozměrné (šíře a výška několik desítek cm, tloušťka stěny až 15 mm).¹⁴



Obr. 1.19 Schéma tažení (pultruze)¹⁴

1.3.11 Výroba prepregů

Prepreg - zkrácený název pro preimpregnovanou vyztužující tkaninu. Obsahuje přesný poměr pryskyřice a výztuže a je ve formě velmi tenkých (0,1-0,5 mm) vrstev, které se mohou předem navrženým způsobem ve formě klást, aby bylo dosaženo požadovaného prostorového uspořádání výztuže a tím i požadovaných fyzikálních vlastností.⁷

Jsou vyráběny na průmyslové bázi, z přesně namíchaných a zkombinovaných složek, proto mají rovnoměrné a reprodukovatelné vlastnosti. K jejich hlavním výhodám patří:¹³

- použitá pryskyřice má vždy přesné složení a vlastnosti,
- přesně odměřené množství pryskyřice snižuje její ztráty,
- pryskyřice s vysokou viskozitou neznečišťuje ruce ani oděv pracovníka,
- možnost přesného řízení vzájemného poměru pryskyřice a vyztužujícího materiálu,
- použité pryskyřice obvykle neobsahují styren a proto nemají negativní vliv na okolní prostředí,
- vyšší mechanické vlastnosti (není třeba použít pryskyřici s nízkou viskozitou, jak je tomu u ručního laminování).

Nevýhodou je především vyšší cena prepregu ve srovnání se samotnou pryskyřicí a samotnou výztuží, poměrně veliký odpad, nutnost skladovat prepregy při nízkých teplotách.

Pro svou finanční náročnost je tato výrobní technologie většinou využívána v letectví a kosmonautice (klapky náběhové a brzdové, dveře, vstupní panely, kryty komunikačních přístrojů, kryty turbín, atd.).⁷

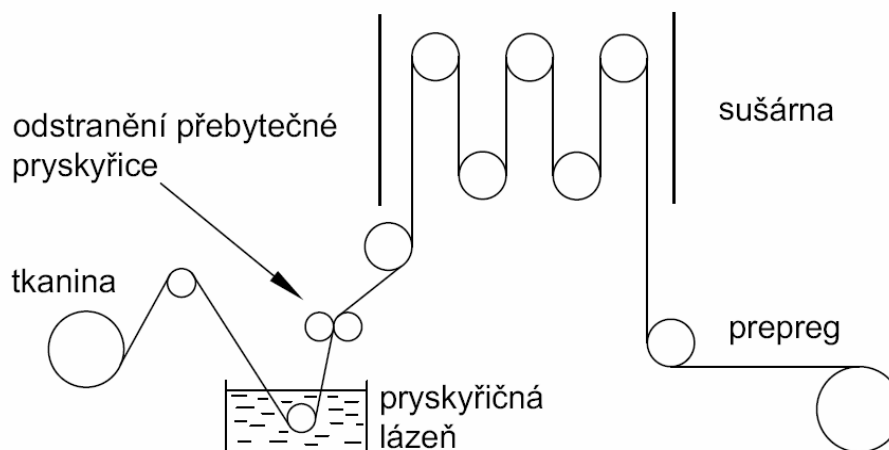
Princip výroby prepregů:

Vyztužující materiál je odvíjen ze zásobníkové role, prochází pryskyřičnou lázní, po opuštění lázně je přebytečná pryskyřice odstraněna (podíl pryskyřice v prepregu dosahuje obvykle hodnot kolem 30%).

V sušárně dojde k odpaření rozpouštědla, pryskyřice se dostane do mezistadia procesu vytvrzování (tzv. „B-stadium“), poté následuje ochlazení, aby se proces vytvrzování zastavil.

Teploty vytvrzování v sušárně se pohybují v rozmezí 120 - 180 °C, u velkoplošných prepregů mohou být nižší (75 °C), pokud je materiál vytvrzován při zvýšeném tlaku.

Vysušený pruh tkaniny je navíjen na buben a aby nedošlo ke slepení materiálu, jsou jednotlivé vrstvy navzájem od sebe oddělovány např. papírem. Novější technologie výroby prepregů využívají pryskyřice ve formě prášku, který je na vyztužující materiál nanášen v elektrostatickém poli (tento způsob nevyžaduje použití rozpouštědel a zkracuje výrobní časy).¹³



Obr. 1.20 Schéma výroby prepregů¹³

1.4 Využití kompozitních materiálů v průmyslové výrobě

V posledních desetiletích se ve strojírenských konstrukcích zvyšují nároky na konstrukční materiály. Na tyto materiály bývají často kladeny nemalé nároky - namáhání na stojích určených pro práci v extrémních podmínkách, chemickém průmyslu nebo v leteckém průmyslu.

Dříve používané kovové materiály jsou nyní nahrazovány materiály, které svými vlastnostmi překonávají dosud používané materiály. Snižování hmotnosti, šetrnost k životnímu prostředí a prodloužení životnosti jsou hlavními důvody, proč kompozitní materiály nacházejí stále větší a větší uplatnění ve strojírenské výrobě. Kompozitní materiály je možné použít v agresivních prostředích, kde dochází u kovových materiálů ke korozi. Kompozity tak přispívají ke značnému snížení nákladů spojených s údržbou a vedoucích ke snížení spotřeby pohonných hmot a energie. Mezi hlavní uživatele patří:⁵

- stavebnictví (železniční a lehké konstrukce, ekologické a chemické stavby, papírenské provozy, stavby pro rozvod energie, telekomunikační stavby, nástavby na výškové budovy, pláště budov, okenní rámy, shrnovací vrata, pracovní a obslužné plošiny, lávky a přechody v provozech s agresivnějším prostředím, rošty pro chemické provozy, čističky a úpravný vod, potravinářské provozy, rozvodná zařízení, atd.),
- nákladní doprava (kontejnery, nákladní návěsy, ramena hydraulických zvedáků, výsuvné plošiny, přívěsy za nákladní i osobní automobily),
- výroba prostředků pozemní hromadné dopravy (interiéry kolejových vozidel, součásti karosérií kolejových vozidel, trolejbusy, autobusy),
- výroba osobních automobilů (obr. 1.23),
- letecký a kosmický a lodní průmysl (obr. 1.21), (obr. 1.22),
- výroba vojenské techniky,
- rozvod elektrické energie (rozvaděče, izolátory, sloupy elektrického osvětlení, kabelové tratě, manipulační tyče, nevodivé obslužné žebříky, atd.),
- výroba sportovních a relaxačních potřeb (golfové hole, luky, hokejky, kajaky) (obr. 1.24),
- oblast reklamy (bilboardy)
- relaxační pomůcky (obr. 1.25).



Obr. 1.21 Lod¹²



Obr. 1.22 Letadlo¹²

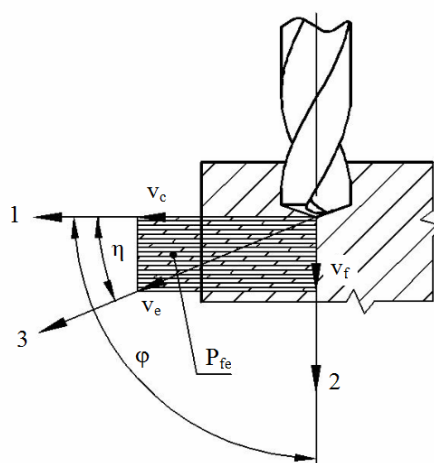
Obr. 1.23 Formule¹²Obr. 1.24 Kajak¹⁵Obr. 1.25 Křeslo¹²

2 OBECNÝ ROZBOR PROBLEMATIKY ŘEZNÝCH SIL PŘI VRTÁNÍ

Vrtání je výrobní technologie, pomocí níž lze zhotovit díry do plného materiálu nebo zvětšit díry již předpracované (předvrtané, předlisované, předlité, atd.). Hlavní pohyb je rotační a vykonává ho ve většině případů nástroj, v některých případech obrobek. Osa vrtáku bývá kolmá k obráběné ploše, ve které vrták vstupuje do obráběného materiálu. Posuv vrtáku je ve stejném směru jako jeho osa.

Charakteristickou vlastností vrtáků je, že se ve směru od obvodu ke středu nástroje zmenšuje řezná rychlost (v ose je tedy nulová). Díky tomu nastávají technologické problémy. Např. to může být příčný břit v ose vrtáku, který vzhledem k nepříznivé geometrii v podstatě třísku neodebírá, ale materiál pouze plasticky deformuje.

Řeznou rychlostí se zpravidla rozumí obvodová rychlost na jmenovitém (největším) průměru nástroje. V případě změny řezné rychlosti podél hlavních břitů vrtáku lze dosáhnout parametrů obroběné plochy (tvar, rozměry, kvalita), které jsou vlastní spíše obráběcím operacím hrubovacího typu.¹⁶



Obr. 2.1 Kinematika vrtacího procesu při vrtání šroubovitým vrtákem¹⁷

1 – směr hlavního pohybu, 2 – směr posuvového pohybu, 3 – směr řezného pohybu, v_c – řezná rychlost, v_f – posuvová rychlost, v_e – rychlost řezného pohybu, P_{fe} – pracovní boční rovina, φ – úhel posuvového pohybu, η – úhel řezného pohybu

Základní kinematické veličiny:¹⁶

- výpočet řezné rychlosti

$$v_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2.1)$$

- výpočet posuvové rychlosti

$$v_f = f \cdot n \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2.2)$$

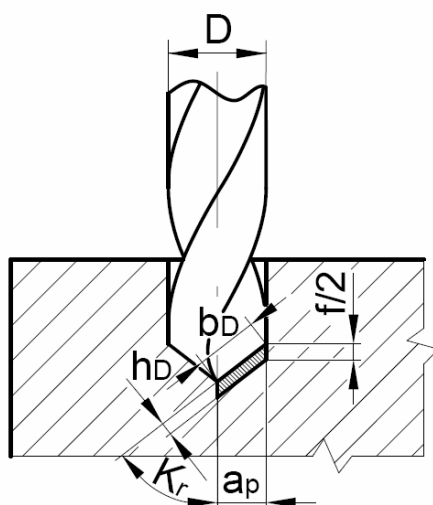
- výpočet rychlosti řezného pohybu

$$v_e = \sqrt{v_c^2 + v_f^2} \quad [\text{m} \cdot \text{min}^{-1}] \quad (2.3)$$

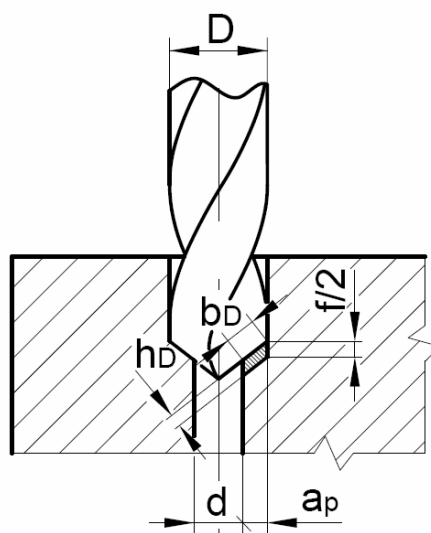
kde: D [mm] – průměr nástroje
 n [min^{-1}] – otáčky nástroje
 f [mm] – posuv na otáčku

Parametry při obrábění

a) Vrtání do plného materiálu



b) Vyvrtávání



Obr. 2.2 Průřez třísky pro vrtání se šroubovitým vrtákem¹⁶

Šířka záběru ostří¹⁶ šroubovitého vrtáku při vrtání díry je $a_p = D/2$, šířka záběru ostří ve směru posuvu $a_f = f/2$

- jmenovitá tloušťka třísky

$$h = \frac{f}{2} \cdot \sin \kappa_r \quad [\text{mm}] \quad (2.4)$$

- jmenovitá tloušťka třísky do plného materiálu

$$b = \frac{D}{2 \cdot \sin \kappa_r} \quad [\text{mm}] \quad (2.5)$$

- jmenovitá šířka třísky při rozšiřování díry

$$b = \frac{D - d}{2 \cdot \sin \kappa_r} \quad [\text{mm}] \quad (2.6)$$

- jmenovitý průřez třísky při vrtání do plného materiálu

$$A_D = h \cdot b = \frac{D \cdot f}{4} \quad [\text{mm}^2] \quad (2.7)$$

- jmenovitý průřez třísky při vyvrtávání

$$A_D = \frac{D-d}{4} \cdot f \quad [\text{mm}^2] \quad (2.8)$$

- výpočet řezné síly

$$F_C = C_{Fc} \cdot D^{x_{Fc}} \cdot f^{y_{Fc}} \quad [\text{N}] \quad (2.9)$$

- výpočet posuvové síly

$$F_f = C_{Ff} \cdot D^{x_{Ff}} \cdot f^{y_{Ff}} \quad [\text{N}] \quad (2.10)$$

kde: D [mm] – průměr vrtáku

d [mm] – průměr předvrtané díry

f [mm] – posuv za otáčku

h [mm] – jmenovitá tloušťka třísky

b [mm] – jmenovitá šířka třísky

κ_r [°] – pracovní úhel nastavení hlavního ostří

C_{Fc} , C_{Ff} [–] – konstanty pro výpočet posuvových sil

x_{Fc} , y_{Fc} , x_{Ff} , y_{Ff} [–] – exponenty pro výpočet posuvových sil

3 EXPERIMENTÁLNÍ ZAŘÍZENÍ PRO MĚŘENÍ ŘEZNÝCH SIL

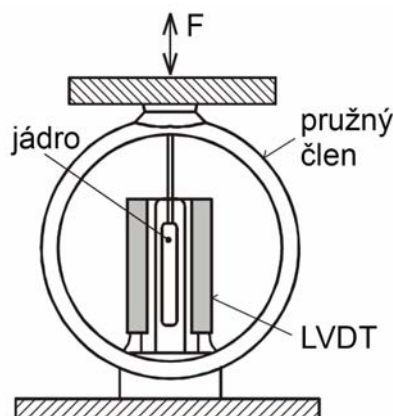
V technické praxi je často zapotřebí v mnoha případech určit síly. Určují se časově proměnné a časově neproměnné síly. U časově proměnných lze síly měřit mechanickými siloměry, kde se využívá principu deformace pružiny (převod síly na mechanickou výchylku), a časově neproměnných, které se určují vážením (porovnání síly s účinky síly tíže na příslušnou hmotu).^{18,19}

Rozdělení snímačů dle fyzikální veličiny, na kterou převádí sílu:²⁰

- mechanické:
 - pružinové - na jeden konec pružiny síla působí, druhý konec je pevně uchycen. Stlačení nebo prodloužení pružiny je úměrné síle (pružinové siloměry a váhy),
 - pákové - pracují na principu protizávaží (váhy),
 - hydraulické - síla tlačí na píst, který následně stlačuje kapalinu. Tlak v kapalině se měří a je úměrný působící síle.
- elektrické:
 - odporové,
 - tenzometrické,
 - se stykovým odporem,
 - snímače polohy k mechanickým snímačům síly,
 - indukční,
 - magnetické,
 - magnetoelastické,
 - magnetoanizotropní,
 - kapacitní,
 - piezoelektrické.

3.1 Indukční snímače sil

Jedná se o pasivní snímače, jejichž přesnost je v rozmezí 1 až 3 %. Jsou navrženy tak, aby síla vyvolala co největší změnu polohy některého význačného bodu pružného členu. Poloha je následně snímána nejčastěji indukčními a kapacitními senzory. Nejčastěji se jako pružný člen používá vetknutý nosník, jehož volný konec ovládá jádro senzoru polohy, nebo pružný rám – který je tvořen prstencem s jádrem a pouzdem senzoru upevněným na protilehlých bodech průměru prstence.^{18,19}



Obr. 3.1 Prstencový pružný člen se senzorem LVDT¹⁸

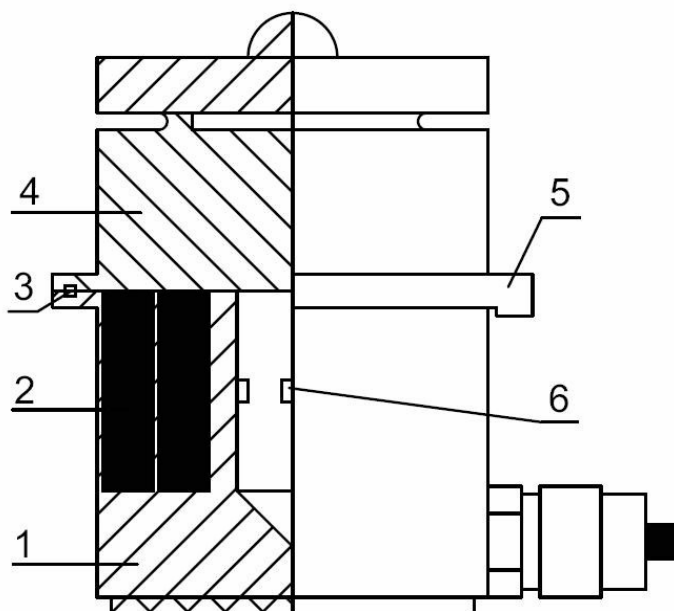
3.2 Magnetoelastické snímače sil

Využívají principu změny magnetické vodivosti feromagnetika, která je úměrná působící síle. Díky své jednoduchosti a spolehlivosti dosáhly tyto snímače největšího rozšíření. Jsou vhodné pro středně těžké a těžké provozy.

Pro tyto snímače se často používá permalloyová slitina (78,5 % Ni), někdy se též používá např. obyčejná měkká ocel.

Chyba následkem trvalé deformace a mechanické hystereze dosahuje $\pm 2\%$ a někdy i více. Rozsah měření od 10 kN až 10 MN.

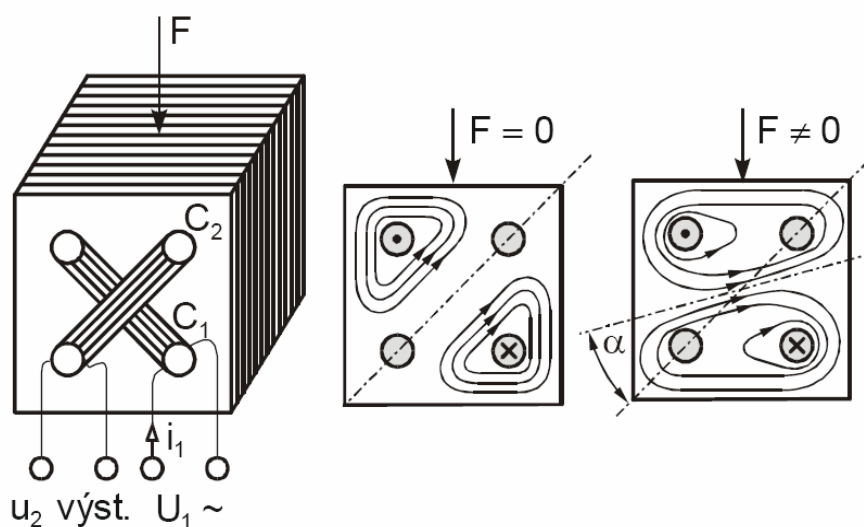
Konstrukce magnetoelastického snímače je znázorněna na obr. 3.2 V magnetickém obvodu 1 je uloženo vinutí snímače 2. Kroužky 3 uzavírají magnetický obvod. Horní kryt 4 je nalisovaným kroužkem 5 spojen s magnetickým obvodem snímače. Kompenzační vinutí 6 vyrovnává vliv teploty na snímač. Maximální dovolené přetížení může dosahovat až 100 %.¹⁹



Obr. 3.2 Schéma magnetoelastického snímače sil¹⁹

3.3 Magnetoanizotropní snímače sil

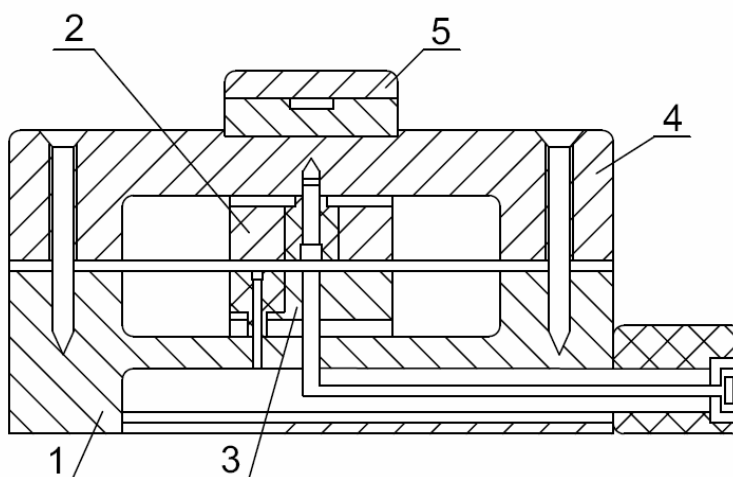
Tyto snímače jsou založeny na změně magnetické vodivosti vlivem deformace feromagnetického jádra. Používají se jak pro malé, tak i velké síly. Pro malé síly se používá jednoduchého uspořádání, snímače velkých sil jsou pak většinou vyráběny jako mnohočlankové. Rozsah měření je až 5 MN, dosahovaná přesnost 0,5 % a přetížitelnost 200 %.¹⁹

Obr. 3.3 Magnetoanizotropní senzor síly¹⁸

3.4 Kapacitní snímače sil

Tyto snímače pracují na principu změny kapacity vlivem síly - využívají změnu vzdálenosti elektrod. Deformační člen má většinou deskovitý tvar, který zároveň tvoří jednu elektrodu kondenzátoru. Vzdálenost mezi elektrodami i kapacita kondenzátoru se mění v závislosti na působící síle.

K tělesu 1 je přišroubována membrána 3. Uvnitř snímače mezi izolačními deskami jsou elektrody kondenzátoru 2 a 3. Tlaková síla je přenášena horní podložkou 5 na membránu v tělese 4, které se deformuje tak, že se změní vzdálenost mezi elektrodami 2 a 3. Snímače tohoto typu jsou určeny pro rozsah 7,5 až 350 kN. Mezi nevýhody patří poměrně malá změna kapacity vyvolaná působící silou, která má za následek malý výstupní signál.^{19,20}

Obr. 3.4 Konstrukce kapacitního snímače sil²⁰

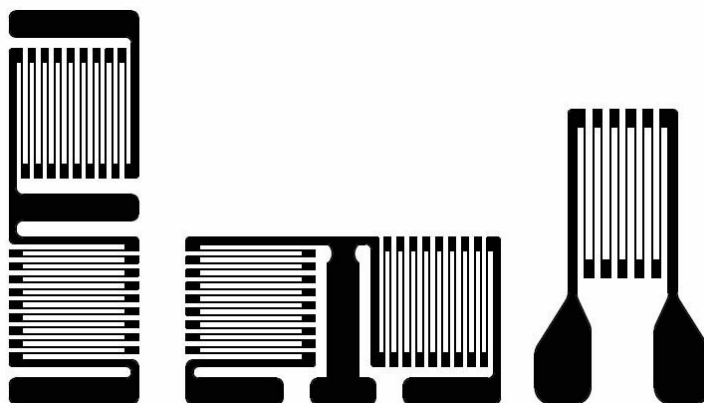
3.5 Tenzometrické odporové snímače síl

Odporové tenzometry pracují na principu pružné deformace měřícího členu působící silou. Převod tlakové a tahové síly na deformaci se provádí pomocí pružných prvků, na jejichž povrch jsou vhodně nalepeny odporové tenzometry. Snímač by měl vykazovat linearitu závislosti na zatížení, poměrné délkové přetvoření a reprodukovatelnost naměřených hodnot.^{19,20}

Má-li pružný prvek plnit svou funkci, musí mít tyto vlastnosti:²⁰

- minimální vnitřní pnutí,
- vysokou mez pružnosti,
- dlouhodobou stabilitu mechanických veličin,
- minimální hysterezi a dopružování materiálu,
- dostatečnou pevnost a odolnost proti porušení,
- lineární průběh pružné deformace v měřeném rozsahu.

Požadavky, které jsou na tyto snímače kladeny, lze plnit především správným výběrem materiálu, tepelným zpracováním a vhodným tvarem pružného prvku. Některé typy snímačů dosahují přesnosti až 0,04 %. Rozsah měření snímačů je od 1 N až desetitisíce N.¹⁹



Obr. 3.5 Ukázka tenzometrů²¹

3.6 Piezoelektrické snímače síl

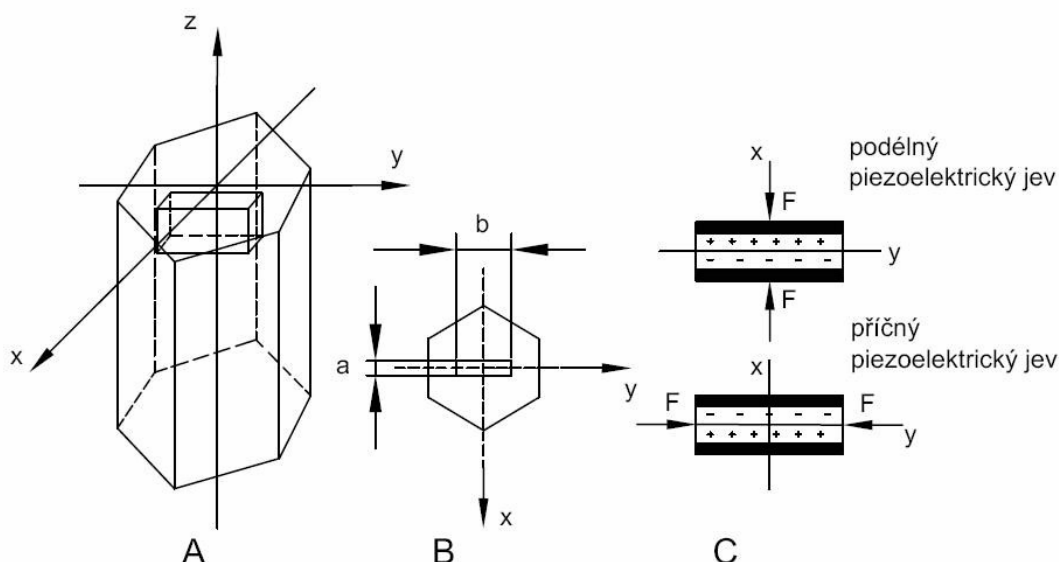
Jsou založeny na tzv. piezoelektrickém jevu. Při působení mechanických deformací dochází u některých druhů krystalů ke vzniku elektrického náboje.

Piezoelektrický snímač síly je skoro tak pevný, jako je rozměrově srovnatelný kus masivní oceli. Pro svou tuhost a pevnost jsou tyto snímače vkládány přímo do strojů, jako součást jejich konstrukce. Pevnost dává těmto snímačům velmi vysokou vlastní frekvenci.

Piezoelektrické snímače jsou proto ideálním prostředkem pro měření rychle se měnících přechodových sil vznikajících při vysokofrekvenčních vibracích. Mechanické napětí působí buď kolmo na elektrody pro sběr náboje (podélný jev), nebo rovnoběžně s jejich rovinou (příčný jev). Také se často využívá možnosti smykové deformace, u které je výhodou větší citlivost a menší rušivé účinky teplotních dilatací konstrukčních dílů senzoru.^{18,22,23}

Materiály používané pro výrobu piezoelektrických snímačů:¹⁸

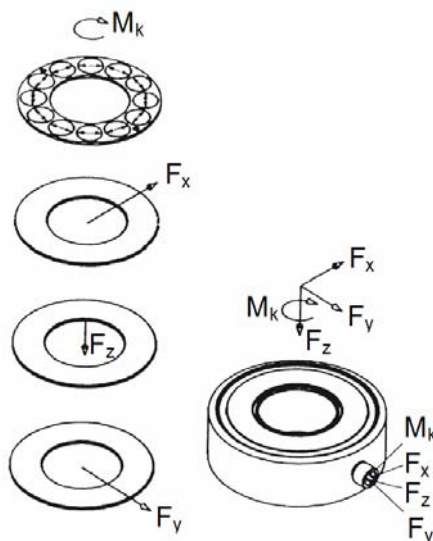
- monokrystaly - SiO_2 , triglycinsulfát TGS, titaničitan lithia LiTaO_3 ,
- polykrystalické keramické materiály - titaničitan barnatý BaTiO_3 , titaničitan olovnatý PbTiO_3 , niobáty,
- organické polymery - polyvinylidendifluorid PVDF.



Obr. 3.6 Piezoelektrický snímač: a) krystal křemene, b) výbrus snímače
c) piezoelektrický jev²³

3.7 Piezoelektrické dynamometry

Tyto dynamometry patří mezi nejčastěji užívané měřicí zařízení. Mohou být použity jako jednoúčelové, kdy měří např. jen složky posuvové síly F_x a M_k při vrtání, kde se jedná o dvousložkový dynamometr, tak i pro frézování, broušení a soustružení, kde se používá třísložkový dynamometr – F_x , F_y , F_z a nebo pro univerzální použití - čtyřsložkový dynamometr, který měří složky F_x , F_y , F_z a M_k .



Obr. 3.7 Konstrukce čtyřsložkového dynamometru²⁴

Vlastnosti piezoelektrických dynamometrů:

- široký rozsah měřených sil,
- možnost měření sil v různých směrech,
- nízká hmotnost (2-7 kg) a malé rozměry,
- snadná obsluha a zápis dat do počítače,
- vysoká citlivost (v závislosti na typu dynamometru),
- poměrně jednoduché vyhodnocení a srovnání naměřených hodnot.

Mezi nevýhody těchto zařízení patří jejich vysoká pořizovací cena a také nutnost nákupu zesilovače.

4 VYHODNOCENÍ EXPERIMENTÁLNĚ NAMĚŘENÝCH HODNOT

4.1 Problematika vrtání vláknově vyztužených kompozitů

Většina vyráběných kompozitů, které se obrábí obsahuje vyztužující vlákna. Ta působí na vrták silným abrazivním účinkem a jsou hlavní příčinou opotřebení nástroje. Proto se klade velký důraz na použitý nástroj a také na jeho geometrii.

Velmi nízká tepelná vodivost kompozitních dílců způsobuje, že je teplo vznikající při řezném procesu odváděno řezným nástrojem. S ohledem na nízkou tepelnou odolnost kompozitních materiálů, při vyšších teplotách (100 - 300 °C), kdy jsou nestálé, je potřeba vhodně volit i řezné podmínky tak, aby nebyla překročena tzv. kritická teplota. Je to teplota, kdy dochází k degradaci matrice a na obrobeném povrchu se začnou objevovat spálené oblasti. Vrtáním lze dosahovat přesností IT10 až IT13 a drsností povrchu $Ra=10-42\mu m$.

Pro vrtání kompozitů jsou používány vrtáky z:

- rychlořezných ocelí s povlakem nebo bez povlaku,
- monolitní povlakované slinuté karbidy,
- polykrystalické diamanty.

U rychlořezných ocelí bez povlaků nebo s povrchovými otěruzdornými povlaky dochází k rychlému opotřebení, tzn. vrtáky mají nízkou trvanlivost a musí se často vyměňovat nebo přestřovat.

Monolitní slinuté karbidy mají velmi dlouhou životnost. Oproti rychlořezným ocelím mají tu výhodu, že mohou být vzhledem k velikosti pracovní části mnohokrát přestřovány. Navíc jsou pro zvýšení trvanlivosti tyto nástroje pokryty různými vrstvami povlaků na bázi karbidů, oxidů, nitridů nebo diamantu. Vrtáky ze slinutého karbidu s pájenými břitovými destičkami dosahují menší životnosti, protože jsou limitovány velikostí samotné destičky.

Polykrystalický diamant dosahuje ve srovnání s výše uvedenými materiály nejvyšší trvanlivosti a tudíž i největší životnosti. Vrtáky jsou vyráběny s pájenými břitovými destičkami.

4.2 Problémy při obrábění

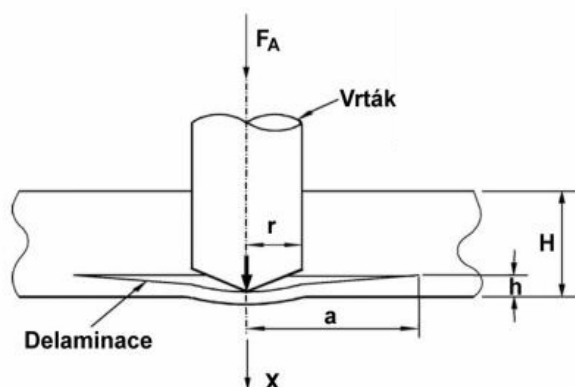
Nejčastějším typem poškození, které je spojováno s vrtáním kompozitních materiálů je delaminace, ke které dochází na vstupu i výstupu vrtáku z materiálu. Jedná se o odlupování povrchové vrstvy na vstupu a odlupování neobrobené vrstvy pod nástrojem při výstupu.

Delaminace vznikající při vrtání klasickým šroubovitým vrtákem probíhá postupně ve dvou fázích. Fáze 1 - působení příčného ostří a fáze 2 - působení hlavního ostří.

První fáze začíná v momentě, kdy tlaková síla od příčného ostří na dosud neobrobenou vrstvu materiálu dosáhne kritické hodnoty a končí poté, co příčné ostří pronikne ven. Při deformaci se nejdříve vytvoří malé vydutí

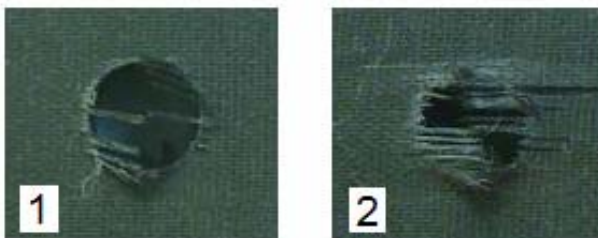
v okolí osy vrtání, a poté se dále šíří ve směru vláken v povrchové vrstvě. Když vyboulení dosáhne mezní hodnoty, povrchová vrstva se rozevře, příčné ostří pronikne ven a začíná druhá fáze.

Delaminace vzniklá v první fázi se v důsledku tlaku a otáčení hlavního ostří vrtáku dále rozvíjí. Příčné ostří řeže materiál obrobku s velkým negativním úhlem, tím sehrává klíčovou roli při procesu. V momentě, kdy příčné ostří prostoupí na povrch, delaminace dosáhne z velké části své konečné velikosti.



Obr. 4.1 Ukázka tvorby delaminace²⁵

Ukázka děr vyvrtaných do kompozitního materiálu je na obr. 4.2. Díra číslo 1 je vrtána jako první a díra číslo 2 jako patnáctá. Z obrázku je zřejmé, že vliv opotřebení vrtáku na delaminaci je značný.



Obr. 4.2 Vliv opotřebení vrtáku na delaminaci²⁵

4.3 Vyhodnocení naměřených hodnot řezných sil

Hlavní výhodou vyhodnocování naměřených hodnot řezných sil je, že poskytuje informace, týkající se řezného procesu, řezných a posuvových sil a krouticích momentů. To hraje důležitou roli při výběru vhodného vrtacího nástroje. Dbát se musí na správné zvolení geometrie nástroje, na kvalitu povlaku a také na jeho odolnost proti opotřebení. To vše má rozhodující vliv na kvalitu povrchu obrobene plochy.

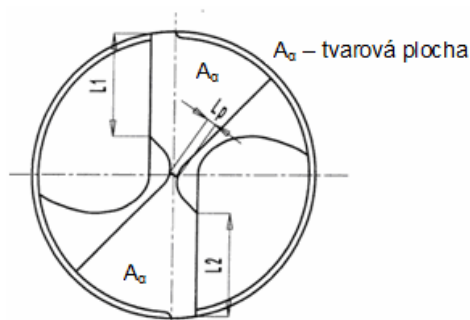
Použité nástroje v experimentu:

- šroubovitě vrtáky z rychlořezných ocelí bez povlaku,
- šroubovitě vrtáky z rychlořezných ocelí s otěruvzdornými povlaky,
- monolitní povlakované vrtáky ze slinutých karbidů.

Vrtáky byly před použitím řádně změřeny a zdokumentovány. Měřil se jmenovitý průměr, tloušťka jádra, délka hlavních a příčných ostří, doplňkové nástrojové úhly nastavení hlavních ostří ψ_r , nástrojový úhel špičky ε_r , nástrojové boční úhly hřbetu α_f a úhel stoupání šroubovice λ .

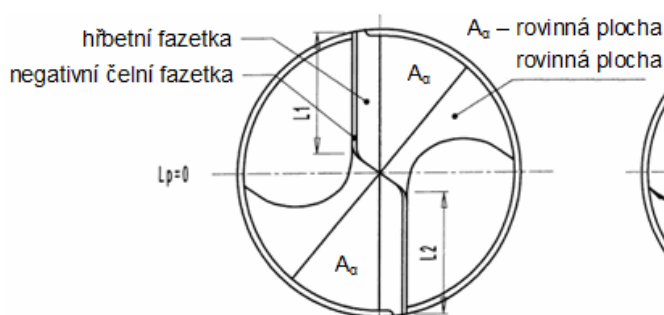
Geometrie špičky vrtáků:

Na obr. 4.3 je znázorněna geometrie vrtáků Gühring z rychlořezné oceli \varnothing 10 mm. Tyto vrtáky mají hřbety broušeny do tvarové, zakřivené plochy a výrazným podbrusem zkrácená příčná ostří.

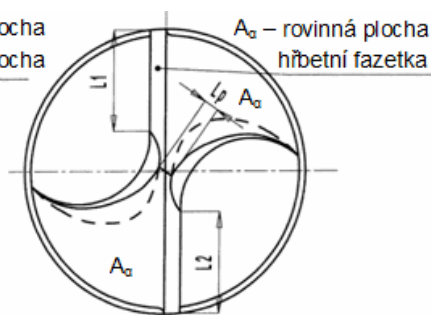


Obr. 4.3 Špička vrtáků HSS Gühring⁵

Monolitní vrtáky ze slinutého karbidu od firmy Gühring, které jsou uvedeny na obr. 4.4 mají oproti předchozímu vrtáku rovinné hřbetní plochy a širokou rovinnou hřbetní fazetku u hlavních ostří, příčná ostří jsou rovněž zkrácena rovinným podbrusem hřbetních ploch.



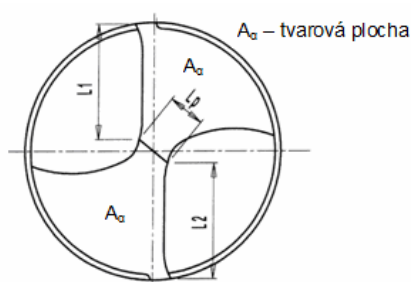
Obr. 4.4 Špička SK vrtáků Gühring⁵



Obr. 4.5 Špička vrtáků Mitsubishi⁵

Všechny použité vrtáky Mitsubishi mají rovinné hřbetní plochy s širokou rovinnou fazetkou u hlavních ostří obr. 4.5. Výrazný rovinný podbrus odlehčuje hřbetní plochu a zcela odstraňuje příčné ostří nástroje.

Vrtáky Zbojovky Vsetín \varnothing 8,6 mm mají nezkrácená příčná ostří obr. 4.6.



Obr. 4.6 Špička vrtáků Zbojovka Vsetín⁵

Obráběné materiály:

- uhlíkový prepreg, rozměry 40x140 mm, tloušťka 9,5 mm, výrobce Letecký ústav, FSI-VUT,
- kompozitní profil vyztužený skelnými vlákny vyrobený pultruzně, rozměry 75x100 mm, tloušťka 9,5 mm, výrobce Prefa, a. s., Brno, obsah vláken 70 %.

Řezné podmínky:

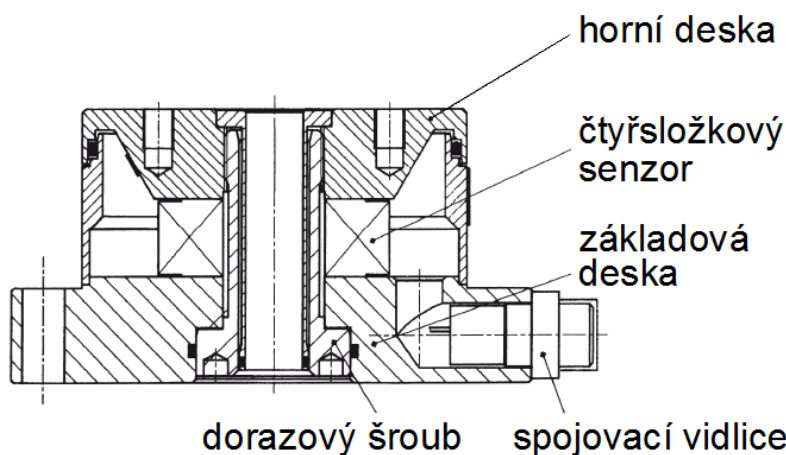
- jsou stanoveny pro každý vrták samostatně

Měřicí zařízení:

- ke snímání složek řezných sil byl použit piezoelektrický dynamometr KISTLER 9272, který byl propojen s osobním počítačem, jenž ukládal naměřené hodnoty posuvové síly F_f a hodnoty krouticího momentu M_k . Doba měření závisela na nastavených řezných podmínkách a tloušťce vrtaných vzorků.



Obr. 4.7 Piezoelektrický dynamometr KISTLER 9272²⁴



Obr. 4.8 Schéma konstrukce piezoelektrického dynamometru KISTLER 9272²⁴

Tab.4.1 Technická data piezoelektrického dynamometru KISTLER 9272²⁴

Označení dynamometru		KISTLER 9272
typ		čtyřsložkový - složka F_z kolmá na upínací plochu dynamometru
užití		univerzální
měřené složky řezné síly		F_x, F_y, F_z, M_k
měřicí rozsah	F_x [kN]	-5 (tah) až 5 (tlak)
	F_y [kN]	
	F_z [kN]	-5 (tah) až 20 (tlak)
	M_k [Ncm]	$\pm 20\,000$
přetížení	F_x [kN]	-6 (tah) až 6 (tlak)
	F_y [kN]	
	F_z [kN]	-6 (tah) až 24 (tlak)
	M_k [Ncm]	$\pm 24\,000$
práh necitlivosti F [N], M_k [Ncm]		$F_x, F_y, F_z\ 0,01; M_k\ 0,02$
citlivost	F [pC N ⁻¹]	$F_y, F_z\ -7,3, F_f\ -3,8$
	M_k [pC N ⁻¹ cm ⁻¹]	-1,6
tuhost	F_x [kN μm^{-1}]	$\approx 0,4$
	F_y [kN μm^{-1}]	
	F_z [kN μm^{-1}]	≈ 2
	M_k [Ncm deg ⁻¹]	$\approx 1\,220\,000$
rozměry (\varnothing upínací základny/ \varnothing tělesa x výška [mm])		140/100x70
hmotnost [kg]		4,5

4.3.1 Rozbor silového namáhání vrtáků - PREPREG

Geometrické parametry vrtáků používaných pro vrtání uhlíkového prepregu, rozměry 40x140 mm, tloušťka 9,5 mm, výrobce Letecký ústav, FSI-VUT.

Pro tento materiál byly použity dva typy vrtáků, oba jsou vyrobeny ze slitutého karbidu.

- vrták Gühring D10 mm, SK – K10/K20, povlak TiAlN – označení gk11
- vrták Mitsubishi D10 mm, SK – GK 20M, povlak TiN – označení mk11

Tab.4.2 Geometrické parametry vrtáků užitých pro vrtání prepregu

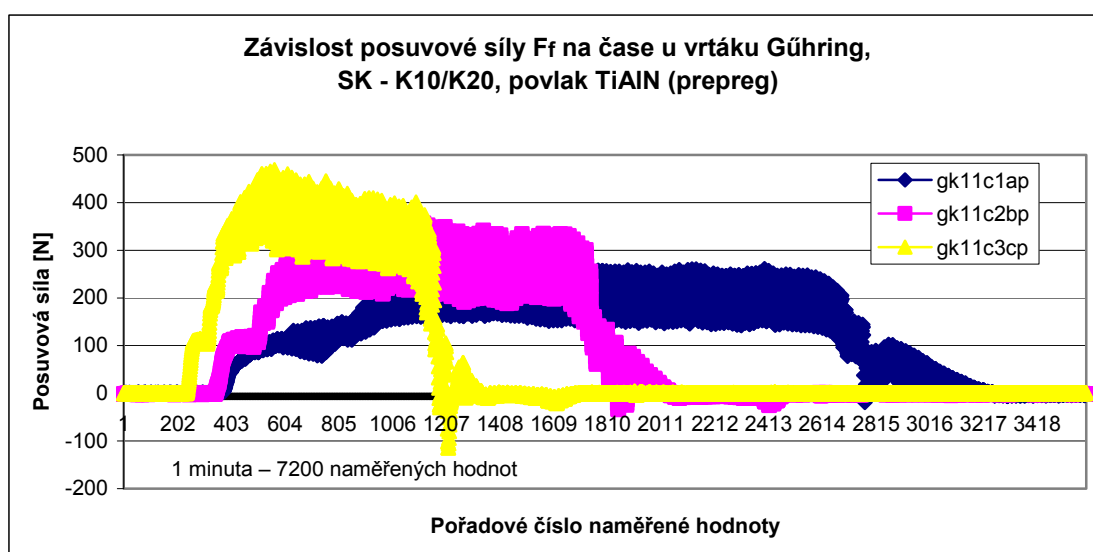
Geometrické parametry			Označení vrtáků	
			gk11	mk11
jmenovitý rozměr [mm]			10	10
úhel sklonu šroubovice λ [°]			30	30
úhel [°]	nastavení (doplňkový)	Ψ_{r1}	30,5	20,0
		Ψ_{r2}		
		Δ_{Ψ}	0	0
	špičky	ε_r	119,0	140,0
	hřbetu	α_{f1}	16,0	14,0
		α_{f2}	16,0	13,7
		Δ_{α}	0	0,3
délka ostří [mm]	hlavní	1	3,56	3,79
		2	3,50	3,91
		Δ	0,06	0,12
	příčné		0,65	0

Vrták firmy Mitsubishi s označením „mk11“ má na čele, těsně u ostří, malou negativní fazetku.

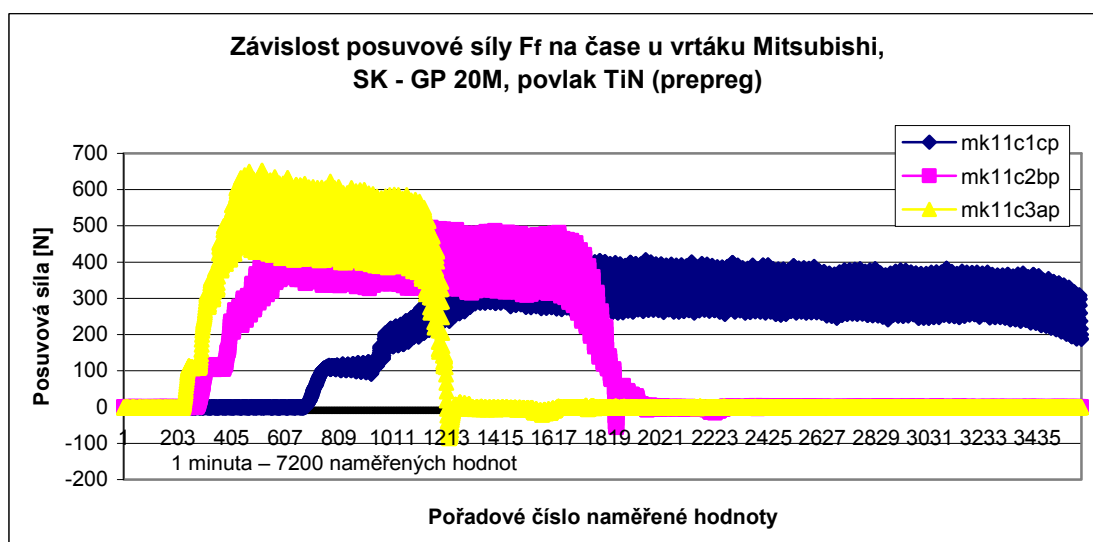
Tab.4.3 Hodnoty posuvové síly a krouticího momentu naměřené při vrtání prepregu

Naměřené hodnoty		Vrták Gühring, SK – K10/K20, povlak TiAlN – gk11			Vrták Mitsubishi, SK – GK 20M, povlak TiN – mk11		
posuv na otáčku f [mm]		0,12	0,20	0,32	0,12	0,20	0,32
označení souboru		gk11c1 ap	gk11c2 bp	gk11c3 cp	mk11c1 cp	mk11c2 bp	mk11c3 ap
díra číslo		41	37	35	26	28	30
posuvová síla F_f [N]	rozsah	149-284	197-362	264-459	245-416	312-523	388-652
	střed	203	270	348	320	406	500
krouticí moment M_k [Nm]	rozsah	0,52-0,93	0,81-1,43	0,88-1,69	0,61-0,95	0,90-1,40	1,10-1,95
	střed	0,80	1,07	1,32	0,79	1,11	1,49

Pro oba typy vrtáků platí: průměr $D = 10$ mm, otáčky $n = 1120 \text{ min}^{-1}$, řezná rychlost $v_c = 35,2 \text{ m min}^{-1}$; maximální hodnoty F_f u vrtáku Gühring mohou být o 10 % až 50 % vyšší; u vrtáků firmy Mitsubishi o 10 % až 40 %.



Obr. 4.9 Závislost posuvové síly F_f na čase u vrtáku Guhring,
SK - K10/K20, povlak TiAlN (prepreg)

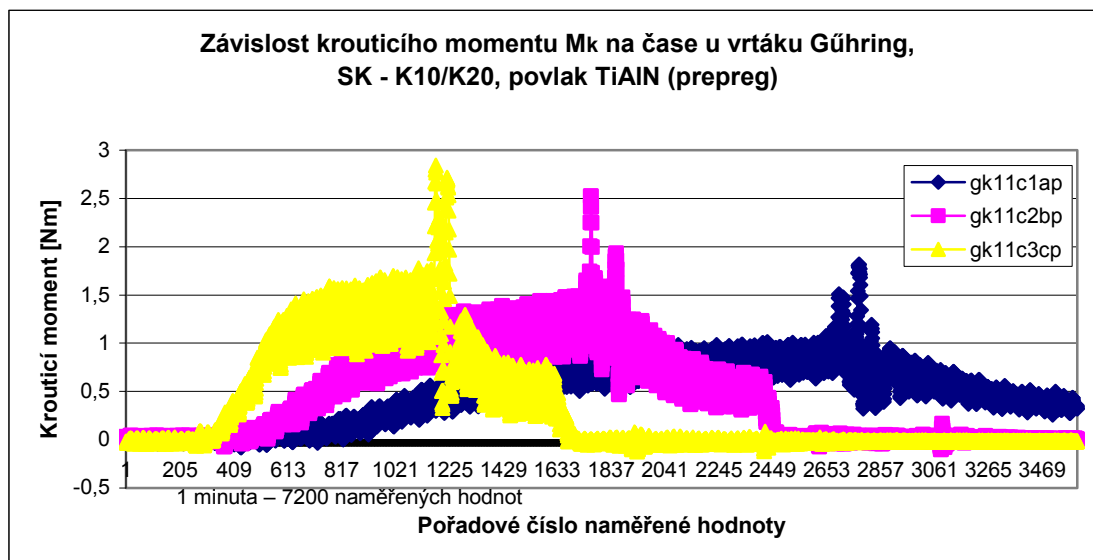


Obr. 4.10 Závislost posuvové síly F_f na čase u vrtáku Mitsubishi,
SK - GP 20M, povlak TiN (prepreg)

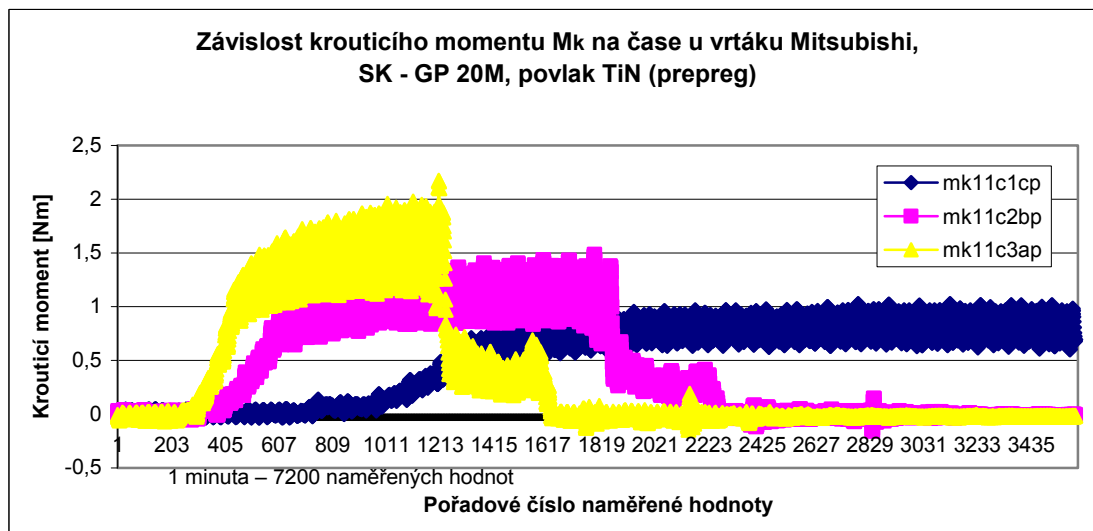
Z výše uvedených grafických závislostí, kde jsou zaznamenány velikosti posuvových sil vyplývá, že s rostoucím posuvem na otáčku f se velmi výrazně mění také velikosti těchto sil. Při posuvu $f = 0,32$ mm dosahují posuvové síly v případě vrtáku Mitsubishi až 652 N a u vrtáku Gühring až 459 N, kdežto u posuvu $f = 0,20$ mm je to u vrtáku Mitsubishi 523 N a u vrtáku Gühring 362 N.

S rostoucí posuvovou silou však souvisí i doba vrtání. Čím je posuv nižší, tím déle trvá, než je díra vyvrtána. Jak je patrné z obou grafů, nejvyšších posuvových sil je dosahováno na počátku rezného procesu, přičemž tato síla postupně klesá a následně strmě padá až k nulovým hodnotám, zde je díra již vyvrtána. Posun do záporných hodnot, je způsoben vtahováním vrtáku do záběru. Po překonání tohoto odporu se vrací zpět k nulové hodnotě.

Průběh krouticího momentu se také při různých hodnotách posuvu f mění. Na níže uvedených grafech jsou zaznamenány hodnoty krouticích momentů, které se rovněž jako posuvové síly mění (zvětšují či zmenšují) v závislosti na posuvu. Při posuvu na otáčku $f = 0,32$ mm dosahuje krouticí moment nejvyšší hodnoty.



Obr. 4.11 Závislost krouticího momentu M_k na čase u vrtáku Guhring, SK - K10/K20, povlak TiAlN (prepreg)



Obr. 4.12 Závislost krouticího momentu M_k na čase u vrtáku Mitsubishi, SK - GP 20M, povlak TiN (prepreg)

Na počátku řezného procesu krouticí moment u vrtáku Gühring pozvolna roste až na hodnotu 1,69 Nm. Pak by se měl snižovat, ale vlivem delaminace prudce vzroste až na hodnotu 2,7 Nm a až pak strmě klesá. U vrtáku Mitsubishi je tomu podobně, jen s tím rozdílem, že zde nedochází k prudkému nárůstu krouticího momentu - jedná se jen o velmi nepatrný, až zanedbatelný přírůstek. V příloze 1 jsou uvedeny samostatné záznamy průběhu posuvových sil a krouticích momentů.

4.3.2 Rozbor silového namáhání vrtáků - KOMPOZIT

Geometrické parametry vrtáků používaných pro vrtání kompozitního profilu vyztuženého skelnými vlákny vyrobený pultruzně, rozměry 75x100 mm, tloušťka 9,5 mm, výrobce Prefa, a. s., Brno, obsah vláken 70 %.

Pro tento materiál byly použity čtyři typy vrtáků, dva jsou vyrobeny ze slitutého karbidu a dva z rychlořezných ocelí.

- vrták Gühring D10 mm, SK – K10/K20, povlak TiAlN – označení gk11
- vrták Gühring D10 mm, HSS, povlak TiN – označení go11
- vrták Mitsubishi D10 mm, SK – GK 20M, povlak TiN – označení mk11
- vrták Zbrojovka Vsetín D8,6 mm, HSS, nepovlakovaný – označení zod6

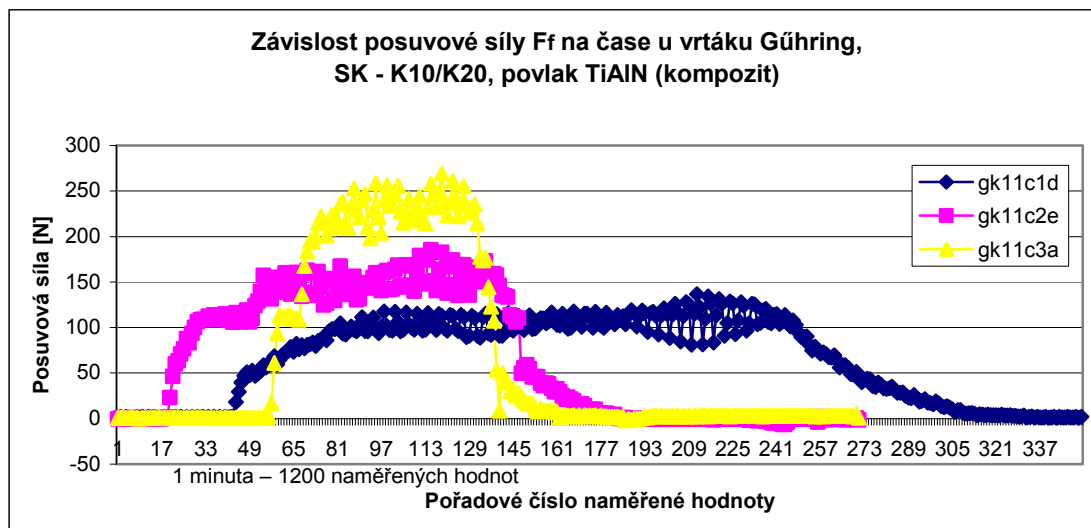
Tab.4.4 Geometrické parametry vrtáků užitých pro vrtání kompozitního materiálu

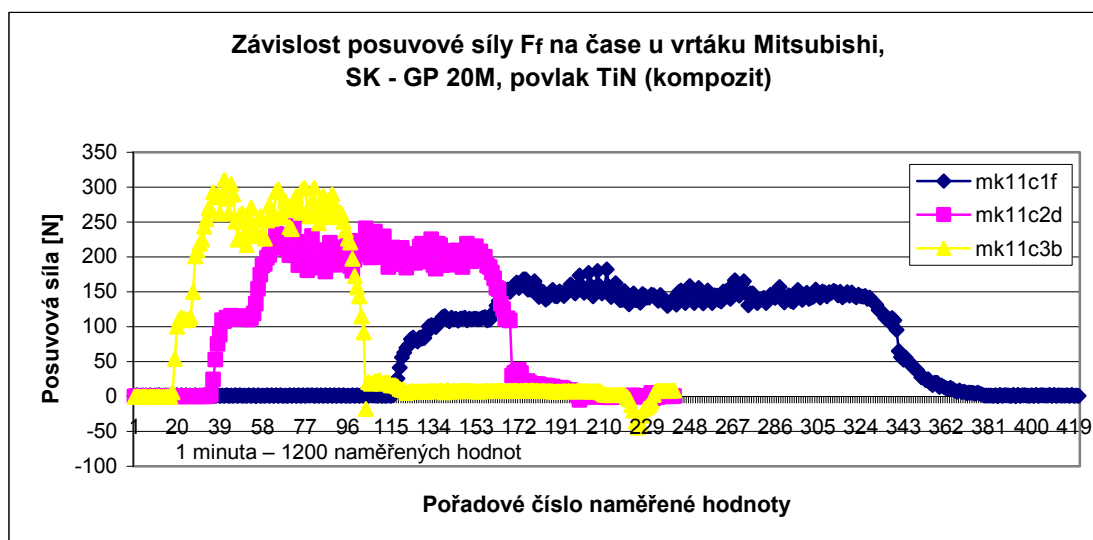
Geometrické parametry			Označení vrtáků			
			gk11	go11	mk11	zod6
jmenovitý rozměr [mm]			10	10	10	8,6
úhel sklonu šroubovice λ [°]			30	28	30	30
úhel [°]	nastavení (doplňkový)	ψ_{r1}	30,5	28,7	20,0	30,3
		ψ_{r2}		29,3		31,0
		Δ_{ψ}	0	0,6	0	0,7
	špičky	ε_r	119,0	122,0	140,0	118,7
	hřbetu	α_{f1}	16,0	11,8	14,0	10,0
		α_{f2}		12,0	13,7	9,7
		Δ_{α}	0	0,2	0,3	0,3
délka ostří [mm]	hlavní	1	3,56	3,78	3,79	4,37
		2	3,50	3,92	3,91	4,28
		Δ	0,06	0,14	0,12	0,09
	příčné		0,65	0,88	0	1,73

Tab.4.5 Hodnoty posuvové síly a krouticího momentu naměřené při vrtání kompozitu

Údaje o vrtáku a jeho označování				Posuvová síla F_f [N]		Krouticí moment M_k [Nm]	
výrobce	díra číslo	označení souboru	posuv na otáčku f [mm]	rozsah	střed	rozsah	střed
Gühring, SK – gk11	30	gk11c1d	0,12	81-131	108	0,12-0,78	0,43
	23	gk11c2e	0,20	124-185	150	0,24-0,90	0,55
	34	gk11c3a	0,32	198-269	234	0,50-1,14	0,77
Gühring, HSS – go11	8	go11c2a	0,20	127-179	147	0,30-0,60	0,41
	12	go11c2c	0,20	167-219	193	0,46-0,74	0,58
	15	go11c2f	0,20	206-288	243	0,36-0,73	0,55
Mitsubishi, SK – mk11	46	mk11c1f	0,12	129-182	147	0,24-0,70	0,44
	51	mk11c2d	0,20	178-244	204	0,16-0,71	0,44
	56	mk11c3b	0,32	216-304	265	0,34-0,88	0,63
Zbrojovka Vsetín, HSS – zod6	10	zod6c2b	0,20	199-313	263	0,38-0,61	0,49
	14	zod6c2d	0,20	273-365	329	0,44-0,69	0,59
	16	zod6c2f	0,20	333-451	388	0,56-0,83	0,69

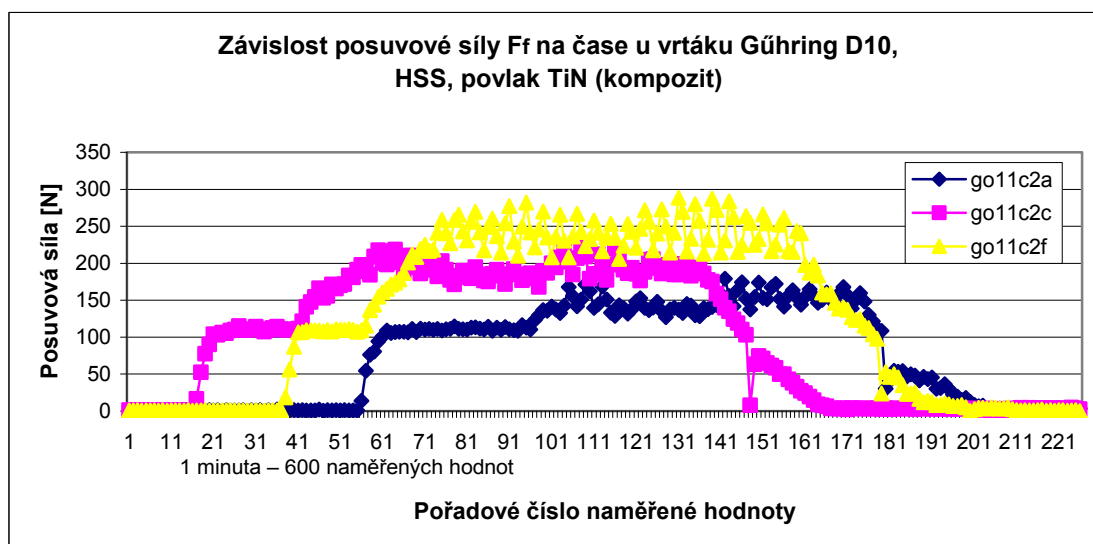
Pro vrtáky od firmy Gühring a Mitsubishi platí: průměr $D = 10$ mm, otáčky $n = 1120$ min^{-1} , řezná rychlost $v = 35,2$ m min^{-1} ; pro vrták Zbrojovky Vsetín platí: $D = 8,6$ mm, otáčky $n = 1120$ min^{-1} , řezná rychlost $v = 30,3$ m min^{-1} ; maximální hodnoty F_f u vrtáků SK mohou být o 10 % až 30 % vyšší; u vrtáků HSS o 10 % až 60 %. U vrtáků HSS byla měřena posuvová síla a krouticí moment pouze při posuvu $f = 0,20$ mm na otáčku.

Obr. 4.13 Závislost posuvové síly F_f na čase u vrtáku Gühring, SK - K10/K20, povlak TiAlN (kompozit)

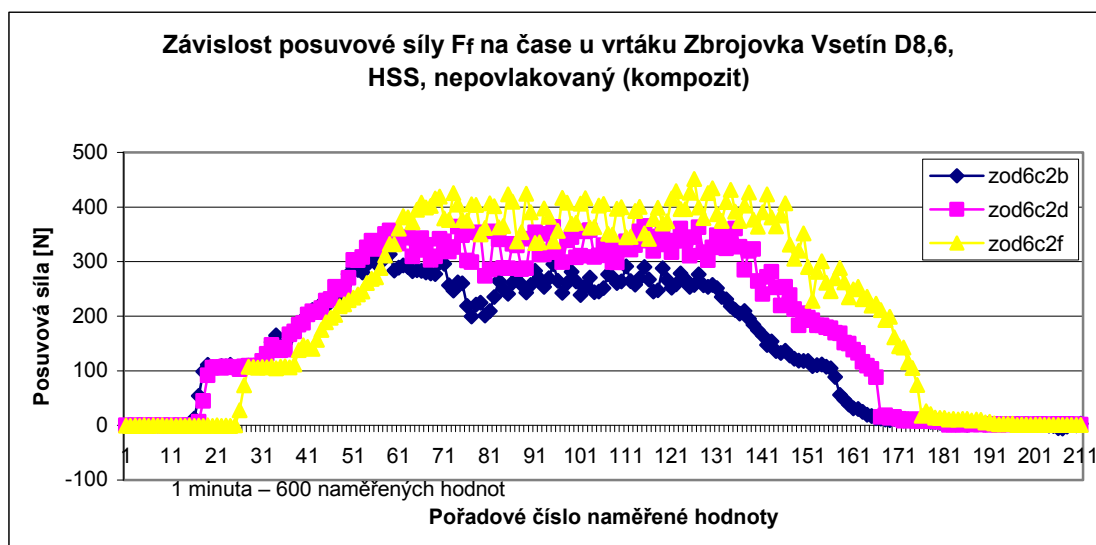


Obr. 4.14 Závislost posuvové síly F_f na čase u vrtáku Mitsubishi,
SK - GP 20M, povlak TiN (kompozit)

Posuv na otáčku f je důležitým parametrem, který ovlivňuje velikost posuvové síly. Při srovnání grafických závislostí u vrtáku Gühring SK a Mitsubishi SK vychází přibližně srovnatelné hodnoty těchto sil. Liší se v rozsahu 50 N. Porovnání s vrtáky Gühring HSS a Zbrojovka Vsetín HSS není možné, protože u těchto vrtáků se při vrtání neměnil posuv na otáčku který byl $f = 0,20$ mm a tudíž je možné srovnání jen mezi nimi. A ani to nemá samo o sobě velkou vypovídací schopnost, protože se tyto vrtáky liší jmenovitým průměrem vrtáku a řeznými rychlostmi.



Obr. 4.15 Závislost posuvové síly F_f na čase u vrtáku Gühring D10,
HSS, povlak TiN (kompozit)



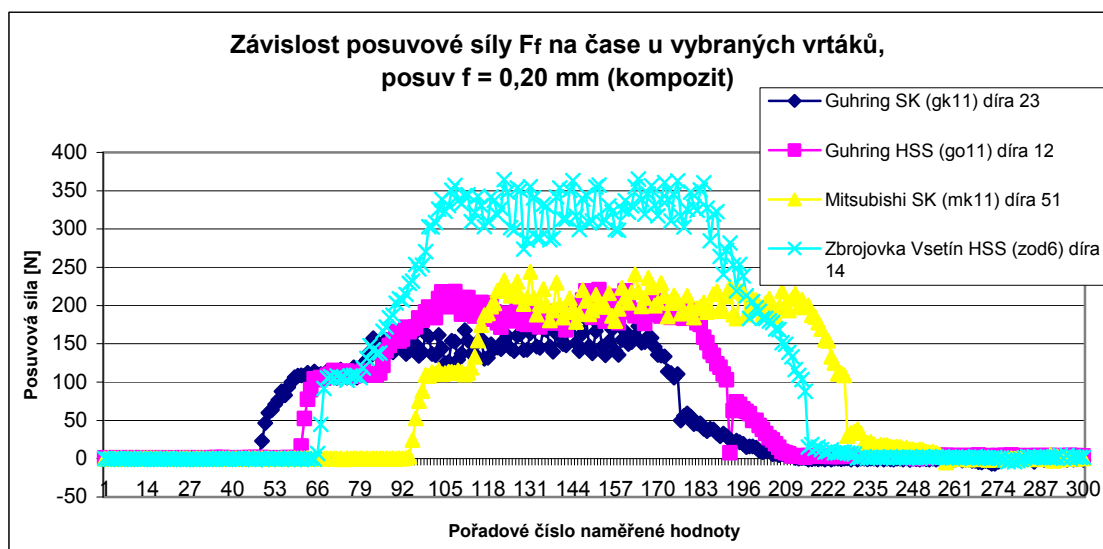
Obr. 4.16 Závislost posuvové síly F_f na čase u vrtáku Zbrojovka Vsetín, HSS, nepovlakovaný (kompozit)

Z výše uvedených grafů je patrné, že vrták firmy Zbrojovka Vsetín HSS dosahuje daleko větších posuvových sil, než je tomu u vrtáku Gühring HSS. To může být způsobeno povlakem, který je na vrtáku Gühring HSS. Velikosti posuvových sil jsou u vrtáku Zbrojovky takřka dvojnásobné (rozsah 199 – 451 N) v porovnání s vrtákem Gühring kde je rozsah 127 – 288 N. Velikosti těchto posuvových sil jsou dány opotřebením vrtáků. S rostoucím počtem vyvrtaných děr roste i opotřebení. Jak již bylo uvedeno výše, je srovnání těchto čtyř typů vrtáků značně komplikované. Na obr. 4.17 je uvedeno srovnání posuvových sil těchto vrtáků pro posuv $f = 0,20$ mm.

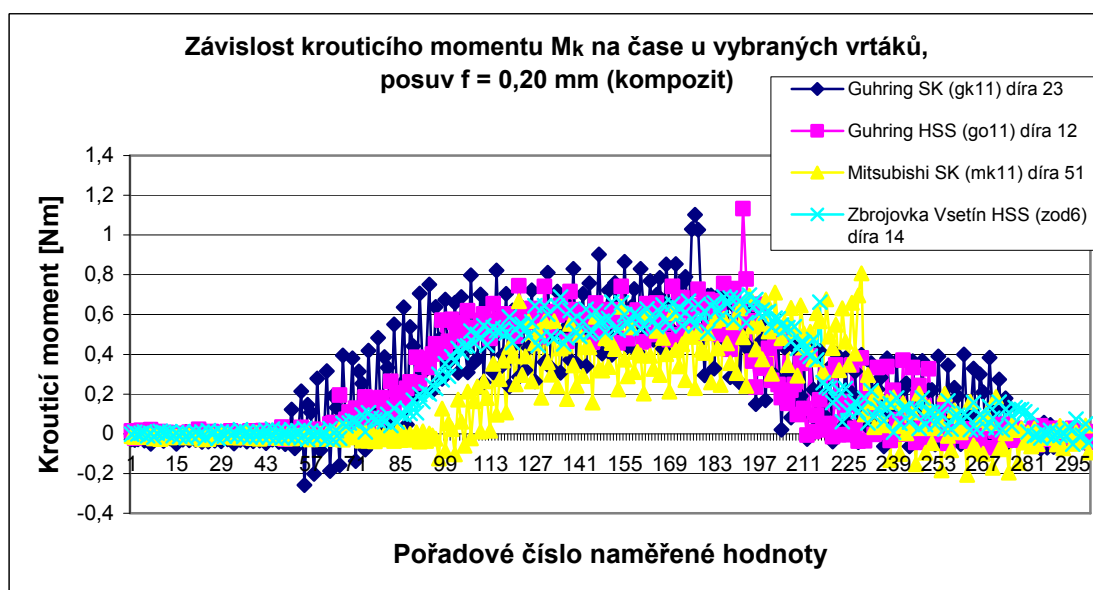
Tab.4.6 Hodnoty posuvové síly a krouticího momentu pro vybrané vrtáky (kompozit)

Údaje o vrtáku a jeho označování				Posuvová síla F_f [N]		Krouticí moment M_k [Nm]	
výrobce	díra číslo	označení souboru	posuv na otáčku f [mm]	rozsah	střed	rozsah	střed
Gühring, SK – gk11	23	gk11c2e	0,20	124-185	150	0,24-0,90	0,55
Gühring, HSS – go11	12	go11c2c	0,20	167-219	193	0,46-0,74	0,58
Mitsubishi, SK – mk11	51	mk11c2d	0,20	178-244	204	0,16-0,71	0,44
Zbrojovka HSS – zod6	14	zod6c2d	0,20	273-365	329	0,44-0,69	0,59

Pro vrtáky od firmy Gühring a Mitsubishi platí: průměr $D = 10$ mm, otáčky $n = 1120$ min^{-1} , řezná rychlost $v = 35,2$ m min^{-1} ; pro vrták Zbrojovky Vsetín platí: $D = 8,6$ mm, otáčky $n = 1120$ min^{-1} , řezná rychlost $v = 30,3$ m min^{-1} .



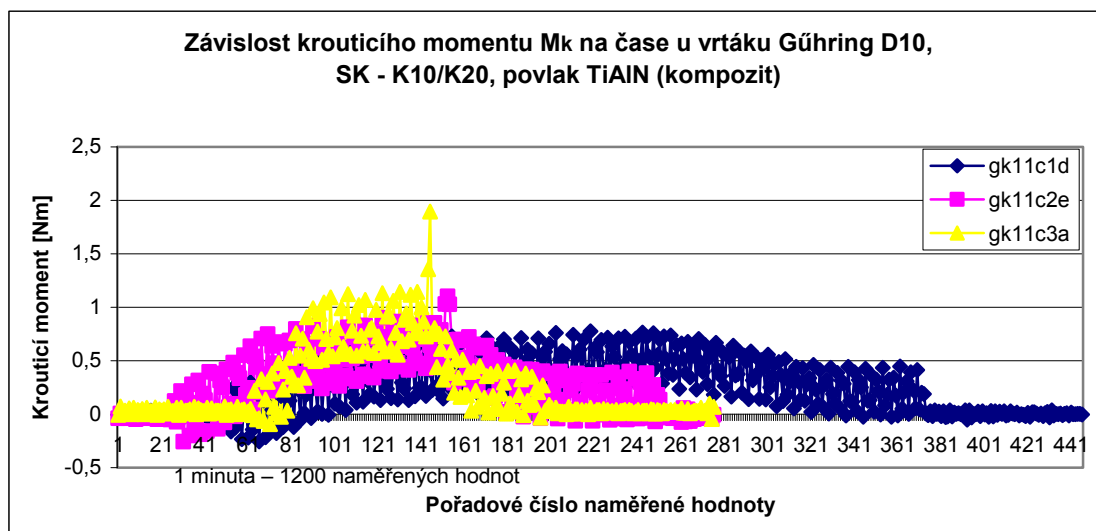
Obr. 4.17 Závislost posuvové síly F_f na čase u vybraných vrtáků,
posuv $f = 0,20$ mm (kompozit)



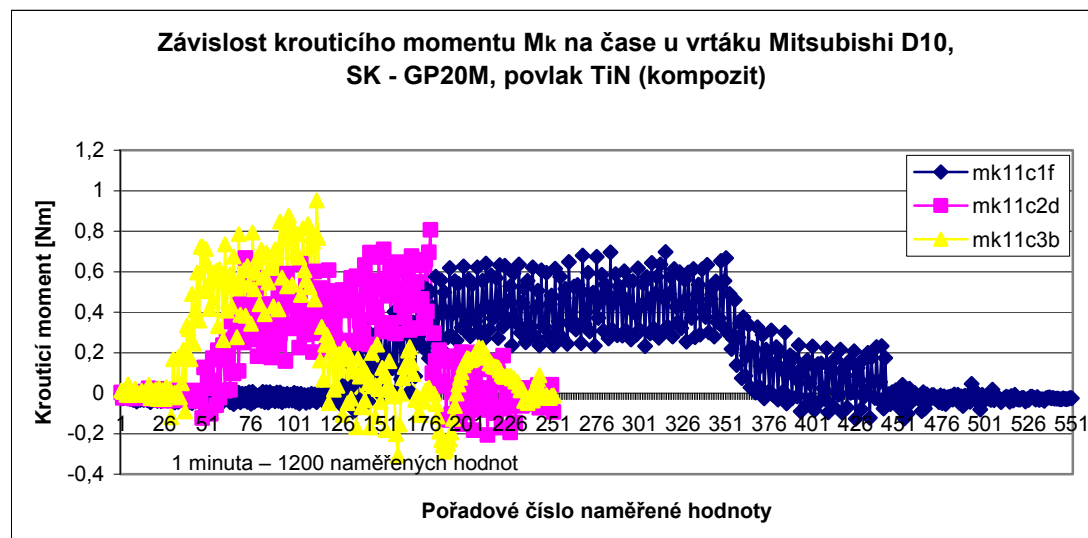
Obr. 4.18 Závislost krouticího momentu M_k na čase u vybraných vrtáků,
posuv $f = 0,20$ mm (kompozit)

Nejlépe, co se týče posuvových sil je na tom vrták firmy Gühring SK následovaný vrtákem Mitsubishi a Gühring HSS. Vrták Zbrojovky Vsetín vychází v tomto srovnání nejhůře.

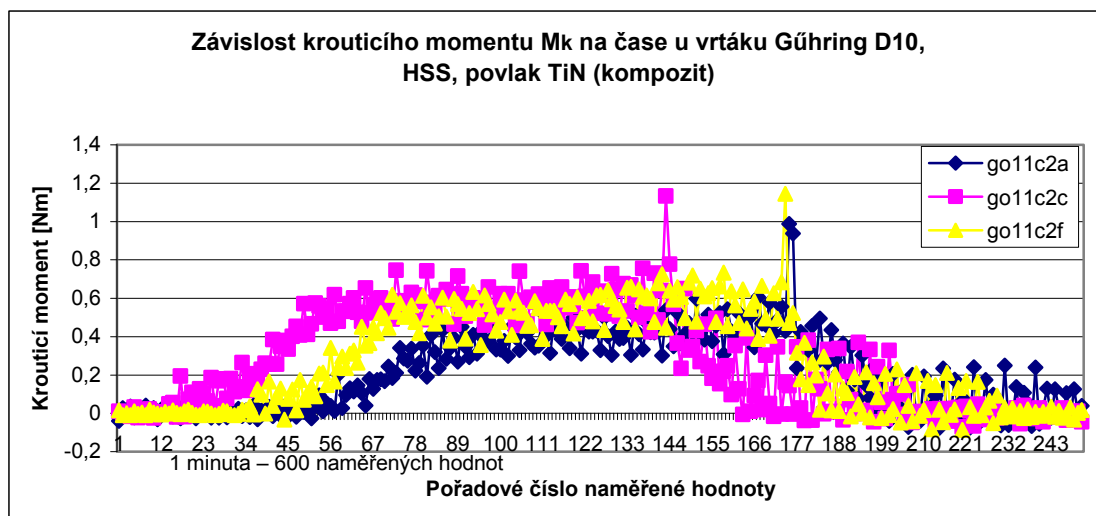
Velikosti krouticích momentů se u uvedených vrtáků opět liší v závislosti na posuvu f . Nejlépe je na tom opět vrták firmy Gühring SK následován ostatními. Průběhy jednotlivých krouticích momentů jsou vedeny na obr. 4.19, obr. 4.20, obr. 4.21 a obr. 4.22. Samostatně jsou pak uvedeny průběhy posuvových sil a krouticích momentů v příloze 2.



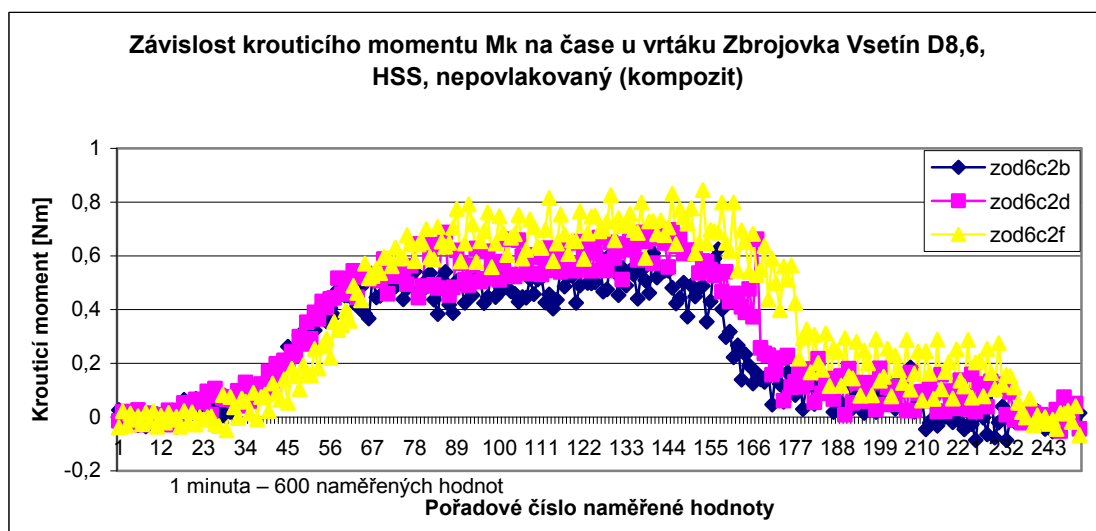
Obr. 4.19 Závislost krouticího momentu M_k na čase u vrtáku Gühring D10,
SK - K10/K20, povlak TiAlN (kompozit)



Obr. 4.20 Závislost krouticího momentu M_k na čase u vrtáku Mitsubishi D10,
SK - GP20M, povlak TiN (kompozit)



Obr. 4.21 Závislost krouticího momentu M_k na čase u vrtáku Gühring D10, HSS, povlak TiN (kompozit)



Obr. 4.22 Závislost krouticího momentu M_k na čase u vrtáku Zbrojovka Vsetín D8,6, HSS, nepovlakovaný (kompozit)

5 TECHNICKO - EKONOMICKÉ HODNOCENÍ

V technické praxi jsou často kladeny velké nároky na snižování nákladů. U vrtáků tomu není jinak. Vhodná volba vrtacího nástroje je jednou z nejdůležitějších činností spojených s výrobou a použitím těchto nástrojů. Čím je nástroj dražší, tím je i kvalitnější. Skloubit tyto dva faktory ale není nikterak jednoduché. V tabulce 5.1 jsou uvedeny ceny vrtáků použitých při experimentu. V tomto technicko – ekonomickém hodnocení nepůjde o komplexní analýzu, neboť nebudou uvažovány náklady na energetickou spotřebu, mzdy pracovníků, náklady na přebroušení nástrojů atd.

Porovnávány byli tři následující typy vrtáků:

- rychlořezná ocel,
 - povlakovaná – Gühring D10 mm, povlak TiN,
 - bez povlaku – Zbrojovka Vsetín D8,6 mm,
- slinutý karbid,
 - Gühring D10 mm, povlak TiAlN.

U vrtáku Mitsubishi SK – GP 20M nebyla provedena zkouška opotřebení, proto zde nemůže být provedeno porovnání s ostatními typy vrtáků. Dá se očekávat, že hodnoty opotřebení u tohoto vrtáku budou dosahovat vyšších hodnot než vrták Gühring SK – K10/K20, povlak TiAlN.

Tab.5.1 Ceny vrtáků

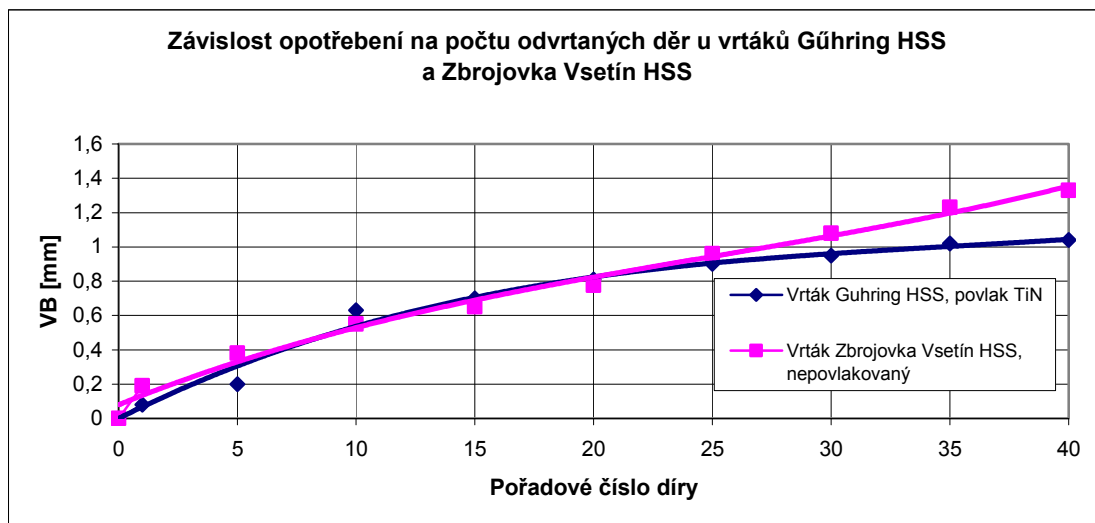
Parametry	Gühring SK – K10/K20	Gühring HSS	Mitsubishi SK – GP 20M	Zbrojovka Vsetín HSS
průměr D [mm]	10	10	10	8,6
označení	gk11	go11	mk11	zod6
povlak	TiAlN	TiN	TiN	bez
cena, bez DPH [Kč]	1704	562	2185	60

Pro správnou volbu vrtáku se musí vycházet z toho, k čemu bude daný vrták používán, při jakých řezných podmínkách a v jakém provozu. Předně musí být zřejmé, jaký materiál bude nástroj obrábět a také, jestli se jedná o kusovou, malosériovou nebo hromadnou výrobu.

V případě kusové a malosériové výroby, jak ukazuje obr. 5.1, znázorňující závislost opotřebení na počtu odvrtných děr u vrtáků z rychlořezných ocelí je intenzita opotřebení u čtyřicáté vrtané díry velmi vysoká. U vrtáku Gühring HSS, povlak TiN je $VB > 1$ mm a u vrtáku Zbrojovka Vsetín HSS, bez povlaku je hodnota ještě vyšší $VB > 1,3$ mm.

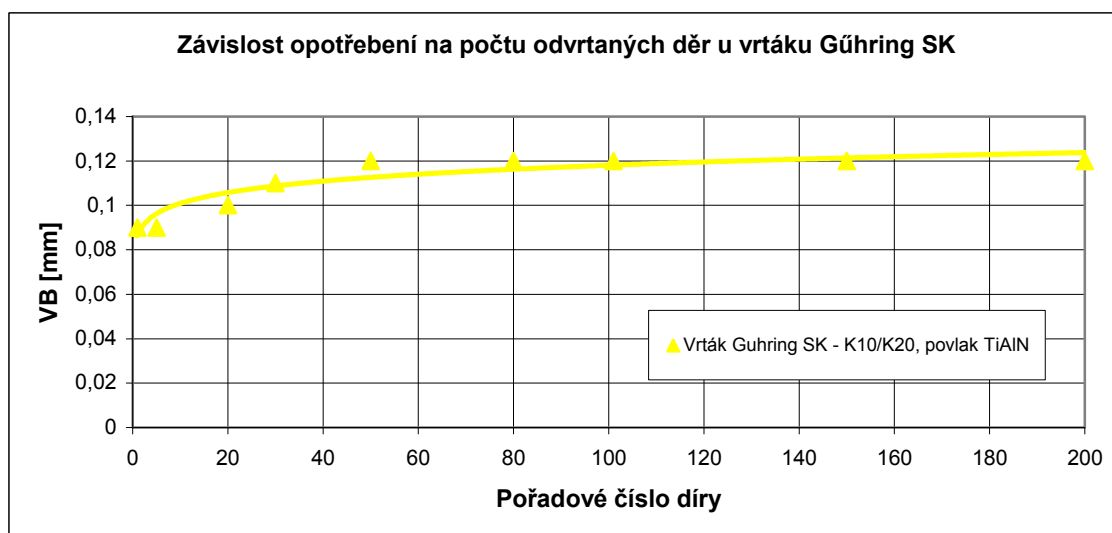
Z těchto uvedených hodnot vyplývá, že povlak sice snižuje intenzitu opotřebení, ale jeho vliv není příliš významný. Proto se při výběru vrtáku zohledňuje jeho pořizovací cena. Ta je v případě vrtáku Zbrojovky, jak ukazuje tabulka 5.1, několikanásobně nižší – (uvažováno pouze s ohledem na trvanlivost, nikoli životnost nástroje).

Hodnoty opotřebení naměřené při zkouškách trvanlivosti vrtáků jsou uvedeny v příloze 3.



Obr. 5.1 Závislost opotřebení na počtu odvrtných děr u vrtáků Gühring HSS a Zbrojovka Vsetín HSS

Jde-li o hromadnou výrobu, kde je kladen větší důraz na kvalitu (životnost a trvanlivost nástroje), musí být použit i odpovídající nástroj. S tím jsou spojeny i vyšší pořizovací náklady. Jak je vidět na obr. 5.2, kde je uvedena závislost opotřebení na počtu odvrtných děr u vrtáku Gühring SK – K10/K20, povlak TiAlN se po počátečním nárůstu opotřebení ustálilo na hodnotě $VB=0,12$ mm. Tato hodnota opotřebení se udržela až po dvousetu vrtanou díru. Z tohoto průběhu se dá očekávat, že s narůstajícím počtem děr a tedy i s narůstající dobou funkce poroste hodnota opotřebení jen velmi mírně. Proto bude doba trvanlivosti u tohoto vrtáku velmi vysoká.



Obr. 5.2 Závislost opotřebení na počtu odvrtných děr u vrtáku Gühring SK

Životnost nástroje je definována jako součet všech jeho trvanlivostí, od prvního uvedení do činnosti až do jeho vyřazení a lze ji vyjádřit vztahem:

$$Z = \sum_{i=1}^{x+1} T_i = (x+1) \cdot T \quad [\text{min}] \quad (5.1)$$

kde: T_i [min] – jednotlivé trvanlivosti,

T [min] – aritmetický průměr hodnot T_i ,

x [-] – počet možných ostření nástroje.

Pokud jsou porovnávány hodnoty naměřených velikostí posuvových sil F_f a krouticích momentů M_k u vrtáků z rychlořezných ocelí a slinutých karbidů, vykazují nástroje vyrobené z rychlořezných ocelí (Gühring HSS, povlak TiN a Zbrojovka Vsetín HSS, bez povlaku) vyšší hodnoty, než vrtáky ze slinutých karbidů. Pro srovnání je to asi dvojnásobná hodnota, co se týče posuvové síly F_f . To je způsobeno velmi intenzivním opotřebením vrtáku v průběhu řezného procesu.

Nejllepšího výsledku z hlediska naměřených řezných sil vykazují vrtáky Gühring SK – K10/K20, povlak TiAlN, kde hodnoty posuvových sil dosahují v případě prepregu 457 N ($M_k = 1,69$ Nm) při posuvu $f = 0,32$ mm a v případě kompozitu 269 N ($M_k = 1,14$ Nm), rovněž při posuvu $f = 0,32$ mm.

Vrtáky firmy Mistubishi mají na obou čelech úzkou negativní fazetku, která zapříčinila vyšší naměřené hodnoty posuvových sil i krouticích momentů. U prepregu byla naměřena hodnota 652 N ($M_k = 1,95$ Nm) při posuvu $f = 0,32$ mm a u kompozitu $f = 304$ N ($M_k = 0,88$ Nm), opět při posuvu $f = 0,32$ mm. Vyšší naměřené hodnoty u obou použitých vrtáků při vrtání prepregu jsou způsobeny vyššími mechanickými vlastnostmi tohoto materiálu.

Vrtáky z rychlořezných ocelí byly použity pouze pro vrtání kompozitního materiálu a tudíž chybí srovnání hodnot naměřených řezných sil se slinutými karbidy, které byly použity pro vrtání obou materiálů. Vrták firmy Gühring HSS dosahoval u posuvové síly F_f hodnoty 219 N ($M_k = 0,74$ Nm) při posuvu $f = 0,20$ mm a vrták Zbrojovky Vsetín opět při posuvu $f = 0,20$ mm hodnoty 365 N ($M_k = 0,69$ Nm). Vzhledem k rozdílné geometrii vrtáků z rychlořezných ocelí (Gühring a Zbrojovka Vsetín), rozdílným řezným podmínkám a odlišnému průměru vrtáků nelze jednoznačně určit, zda má povlakování výrazný vliv na hodnoty řezných složek.

Závěrečné shrnutí:

Z experimentu vyšel nejlépe vrták Gühring SK – K10/K20, povlak TiAlN, který, ať už se jedná o kompozitní materiál nebo o prepreg dosahoval nejlepších výsledků. Pro kusovou a malosériovou výrobu není tento vrták příliš vhodný, co se týče vyšší pořizovací ceny.

Jako druhý v pořadí skončil vrták firmy Mitsubishi SK – GP 20M, ten nedosahoval takových výsledků jako Gühring SK. Při srovnání cen obou vrtáků je vrták Gühring SK levnější.

Vrták firmy Gühring HSS, povlak TiN a vrták Zbrojovky Vsetín nedosahovaly tak přesvědčivých výsledků, jako prvně dva jmenované. Nicméně je použití těchto vrtáků v kusové a malosériové výrobě výhodné.

ZÁVĚR

Kompozitní materiály mají v současnosti již své nezastupitelné místo. Používají se v různých oblastech vědy a techniky, kde již klasické materiály selhávají. Díky mechanickým, korozním a teplotním vlastnostem těchto materiálů lze vyrobit požadovaný dílec s takovými parametry, které jsou pro klasické materiály takřka nedosažitelné. Uplatnění nalézají tyto materiály zejména v leteckém a automobilovém průmyslu (nárazníky, interiér, části motoru), ale také například ve stavebnictví, elektrotechnice a chemickém průmyslu. Samostatnou kapitolou je zdravotnictví, které se bez těchto materiálů v určitých oblastech vůbec neobejde (bílé zubní plomby, náhrady kostí).

Velká spotřeba kompozitních materiálů ve vyspělých průmyslových zemích dává tušit, že nastolený trend v používání a nahrazování tradičních materiálů materiály kompozitními bude i nadále pokračovat. Proto je důležitý i další vývoj těchto materiálů. Současně s tímto vývojem probíhá i vývoj tzv. nanakompozitů, které například u polymeru zlepšují pevnost, modul pružnosti tvarovou stálost za tepla a odolnost proti hoření.

Kompozity lze obrábět na běžných kovoobráběcích strojích. Obrábění kompozitních materiálů je ovšem složitější a musí se volit vhodné řezné podmínky, které vyžadují velkou pečlivost. Mezi nejrozšířenější obráběcí operace patří řezání (dělení), soustružení, frézování a zejména vrtání (výroba děr pro různé spojovací součásti). Nejčastěji se obrábí kompozitní materiály obsahující skelná, uhlíková nebo aramidová vlákna, která jsou vázána epoxidovou nebo fenolovou pryskyřicí.

Pro měření posuvových sil a krouticích momentů byl v experimentu použit čtyřsložkový dynamometr Kistler 9272, který byl propojen s počítačem a pomocí speciálního programu vyhodnocoval naměřená data. Z průběhů křivek vyplývá, že vrtáky ze slinutých karbidů dosahovaly nižších posuvových sil, než vrtáky z rychlořezných ocelí. Nejlepších výsledků dosáhl vrták firmy Gühring SK – K10/K20. Naopak nejhorších výsledků vrták Zbrojovky Vsetín HSS. Tuzemský výrobce tak neuspěl v porovnání se zahraniční konkurencí.

Vrtáky z rychlořezných ocelí nejsou pro vrtání těchto kompozitů příliš vhodné, protože dochází k jejich rychlému opotřebení a nárůstu posuvových sil (2krát větší než u slinutých karbidů), kterému příliš nezabrání ani případný povlak vrtáku. Proto je užití vrtacích nástrojů ze slinutých karbidů nejlepší variantou (berou se v úvahu jen vrtáky použité při experimentu).

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

1. MÍŠEK, B. *Polymery, keramika, kompozity*. 1. vyd. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, 1993. 155 s. ISBN 80-214-0521-X.
2. AGARWAL, B.D., BROUTMAN, L.J. *Vláknové kompozity*. PRAHA: SNTL - Nakladatelství technické literatury, 1987. 296 s.
3. MÍŠEK, B. *Kompozity*. 1. vyd. BRNO: Technický dozorčí spolek Brno - Sekce materiálů a svařování, 2003. 81 s. ISBN 80-903386-0-7.
4. HAVEL COMPOSITES CZ s.r.o. *Kompozitní materiály* [online]. [citováno 20.dubna 2009]. Dostupné na WWW: <<http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/74-Vseobecny-a-zakladni-popis-materialu-pouzivanych-pri-vyrobe-kompozitu.html>>.
5. HUMÁR, A. *Obrábění vláknově vyztužených kompozitů*. 1. vyd. BRNO: VUTIUM, 2004. 26 s. ISBN 80-214-2740-X.
6. PTÁČEK, L. a kol. *Nauka o materiálu II*. 1. vyd. BRNO: Akademické nakladatelství CERM, 2002. 392 s. ISBN 80-7204-130-4.
7. JANČÁŘ, J. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. 1. vyd. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, fakulta chemická, 2003. 194 s. ISBN 80-214-2443-5.
8. KOŘÍNEK, Z. *Technologie* [online]. [citováno 25.března 2009]. Dostupné na WWW: <<http://www.volny.cz/zkorinek/technologie.pdf>>.
9. TECHNICKÁ UNIVERZITA V LIBERCI. FAKULTA STROJNÍ. *Nadmolekulární struktura polymerů* [online]. [citováno 18.dubna 2009]. Dostupné na WWW: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/skripta_tkp/sekce_plasty/01-plasty%20uvod/11-struktura.jpg>.
10. DAĐOUREK, K. *Kompozitní materiály - druhy a jejich využití*. 1. vyd. LIBEREC: Technická univerzita v Liberci, 2007. 114 s. ISBN 978-80-7372-279-1.
11. KOŘÍNEK, Z. *Vlákna* [online]. [citováno 24.března 2009]. Dostupné na WWW: <<http://www.volny.cz/zkorinek/vlakna.pdf>>.
12. HAVEL COMPOSITES CZ s.r.o. *Katalog 2009* [online]. [citováno 12.května 2009]. Dostupné na WWW: <http://www.havel-composites.com/havel_composites_maly_cz_katalog.pdf>.
13. HUMÁR, A., PÍŠKA, M., JANSKÝ, M., PODRÁBSKÝ, T., ČECH, V. *Technologie zpracování nových kompozitních materiálů tuzemské výroby*. Závěrečná zpráva grantového projektu GAČR č.101/98/0855. BRNO: Vysoké učení technické v Brně, Ústav strojírenské technologie, 2000. 154 s.
14. HAVEL COMPOSITES CZ s.r.o. *Technologie výroby kompozitů* [online]. [citováno 25.března 2009]. Dostupné na WWW: <<http://www.havel-composites.com/clanky/4-Technologie/76-Technologie-jejich-popis-a-schemata.html>>.

15. MAČKAL, J. *Kompozitové lodě* [online]. [citováno 13.května 2009]. Dostupné na WWW: <<http://www.kayakcentrum.com/lode/lode-eshop.php?lode/kompozitove-lode/12/turisticky-kajak-msc-450/36/>>.
16. ŘASA, J., GABRIEL, V. *Strojírenská technologie 3 - 1. díl*. 1. vyd. PRAHA: Pedagogické nakladatelství Scientia, spol. s r.o., 2000. ISBN 80-7183-207-3.
17. KOCMAN, K. a PROKOP, J. *Technologie obrábění*. 2. vyd. BRNO: Akademické nakladatelství CERM, 2005. 270 s. ISBN 80-214-3068-0.
18. ĎAĎO, S., KREIDL, M. *Senzory a měřicí obvody*. 2. vyd. PRAHA: Vydavatelství ČVUT, 1999. 315 s. ISBN 80-01-02057-6.
19. VŠB-TU OSTRAVA. FAKULTA MECHANIKY. *Měření sil, momentů, indikace okamžité polohy* [online]. [citováno 15.dubna 2009]. Dostupné na WWW: <http://www.337.vsb.cz/materialy/experimentalni_mechanika/ME-RENI_SIL.pdf>.
20. VŠB-TU OSTRAVA. FAKULTA HORNICKO-GEOLOGICKÁ. *Snímače síly* [online]. [citováno 13.dubna 2009]. Dostupné na WWW: <http://hgf.vsb.cz/neu10/studium/ashv/texty/doly/08_b_sila_hmotnost.pdf>.
21. KARAS, O. *Měření veličin v mechanice tuhých a poddajných látek* [online]. [citováno 18.dubna 2009]. Dostupné na WWW: <<http://www.kvetakov.net/down.php?file=./UEIKMT/2/Is/ISAME/MTVKap2.pdf>>.
22. ZPRAVODAJ. *Měření síly a odvozených veličin* [online]. [citováno 17.dubna 2009]. Dostupné na WWW: <http://www.omegaeng.cz/literature/PDF/techinfo_3.pdf>.
23. SMUTNÝ, P. *Elektrické tlakoměry* [online]. [citováno 19.dubna 2009]. Dostupné na WWW: <http://e-automatizace.vsb.cz/ebooks.cz/mmv/tlak/tlak_tlakomery_elektricke.htm>.
24. KISTLER. *4-Component Dynamometer* [online]. [citováno 29.dubna 2009]. Dostupné na WWW: <http://www.kistler.com/cz_cz-cz/131_Productfinder_ForceSensors/F13xx.9272.5/4-Component-Dynamometer-20-kN.html>.
25. SEDLÁČEK, J. *Problémy při obrábění kompozitních materiálů* [online]. [citováno 25.dubna 2009]. Dostupné na WWW: <<http://www.mmspektrum.com/clanek/problemy-pri-obrabeni-kompozitnich-materialu>>.

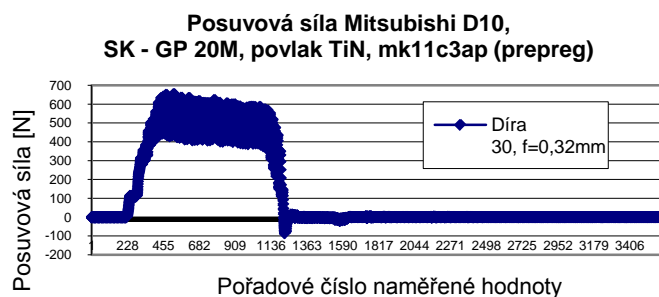
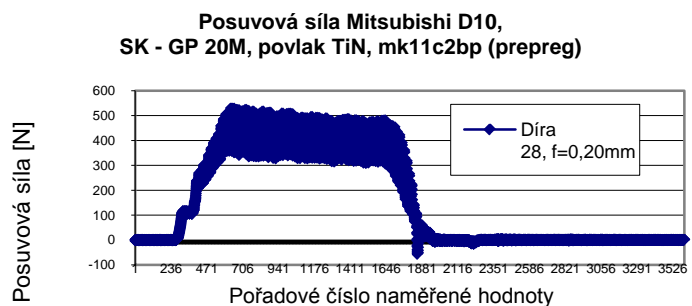
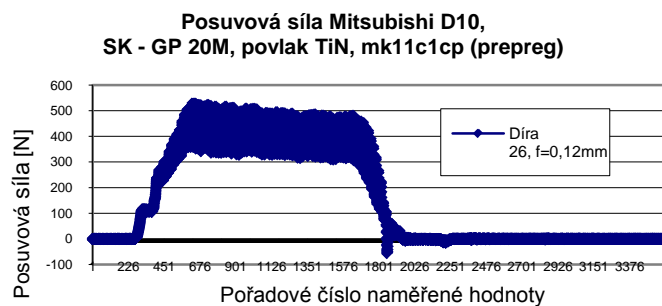
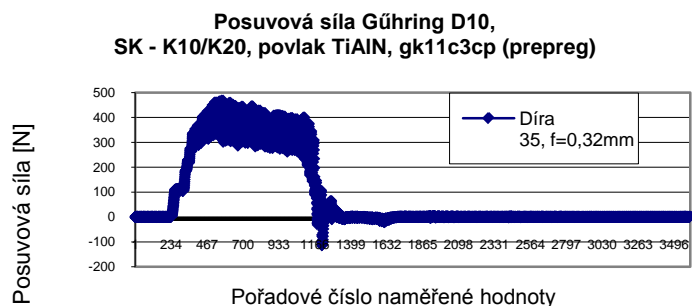
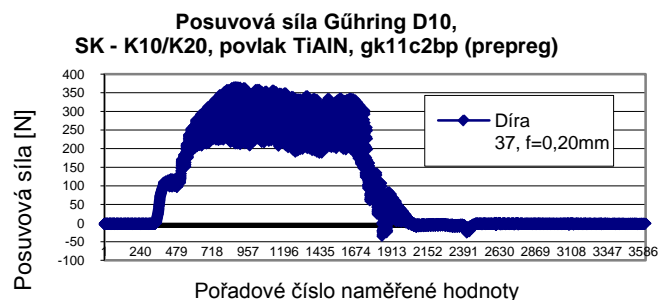
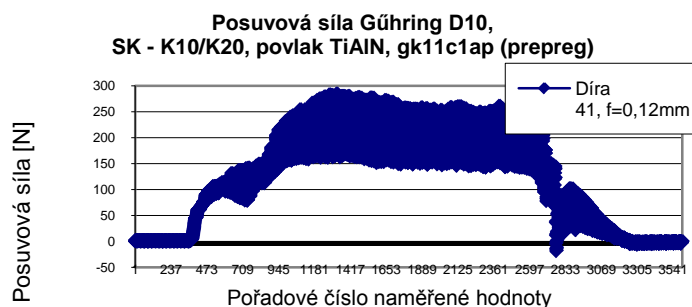
SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratka/Symbol	Jednotka	Popis
A_D	$[mm^2]$	jmenovitý průřez třísky
D	$[mm]$	průměr vrtáku
d	$[mm]$	průměr předvrtané díry
R_a	$[μm]$	drsnot povrchu
a_f	$[mm]$	záběru ostří ve směru posuvu
a_p	$[mm]$	šířka záběru při vrtání díry
b	$[mm]$	jmenovitá šířka třísky
f	$[mm]$	posuv na otáčku
h	$[mm]$	jmenovitá tloušťka třísky
n	$[min^{-1}]$	otáčky nástroje
v_c	$[m.min^{-1}]$	řezná rychlost
v_e	$[m.min^{-1}]$	rychlost řezného pohybu
v_f	$[m.min^{-1}]$	posuvová rychlost
P_{fe}	$[-]$	pracovní boční rovina
K_r	$[°]$	pracovní úhel nastavení hlavního ostří
$φ$	$[°]$	úhel posuvového pohybu
$η$	$[°]$	úhel řezného pohybu
F_c	$[N]$	řezná síla
F_f	$[N]$	posuvová síla
C_{Fc}	$[-]$	konstanta pro výpočet řezných sil
C_{Ff}	$[-]$	konstanta pro výpočet posuvových sil
x_{Fc}	$[-]$	exponent pro výpočet řezných sil
y_{Fc}	$[-]$	exponent pro výpočet řezných sil
x_{Ff}	$[-]$	exponent pro výpočet posuvových sil
y_{Ff}	$[-]$	exponent pro výpočet posuvových sil
$λ$	$[°]$	úhel sklonu šroubovice
$ψ_{r1}$	$[°]$	úhel nastavení (doplňkový)
$ψ_{r2}$	$[°]$	úhel nastavení (doplňkový)
$ε_r$	$[°]$	úhel špičky
$α_{f1}$	$[°]$	úhel hřbetu
$ρ$	$[kg.m^{-3}]$	měrná hmotnost
R_m	$[MPa]$	pevnost v tahu
E	$[MPa], [GPa]$	modul pružnosti v tahu

SEZNAM PŘÍLOH

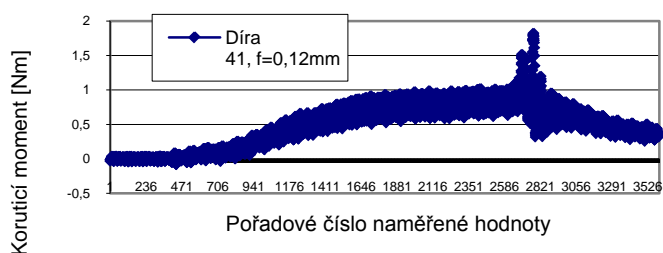
- Příloha 1 Grafické závislosti posuvových sil a krouticích momentů na čase (prepreg)
- Příloha 2 Grafické závislosti posuvových sil a krouticích momentů na čase (kompozit)
- Příloha 3 Hodnoty opotřebení naměřené při zkouškách trvanlivosti vrtáků

PŘÍLOHA č.1 - Grafické závislosti posuvových sil a krouticích momentů na čase (prepreg)

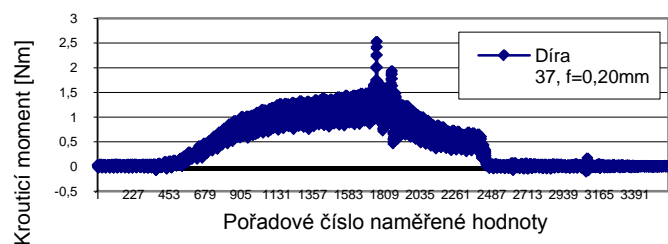


PŘÍLOHA č.1 - pokračování

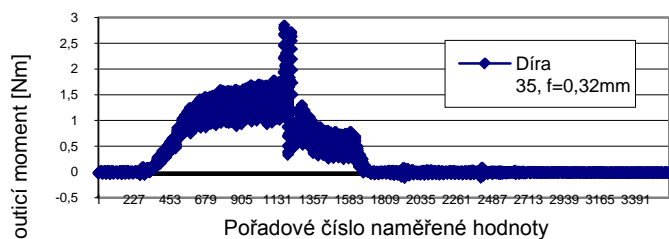
**Krouticí moment Gühring D10,
SK - K10/K20, povlak TiAlN, gkc1ap (prepreg)**



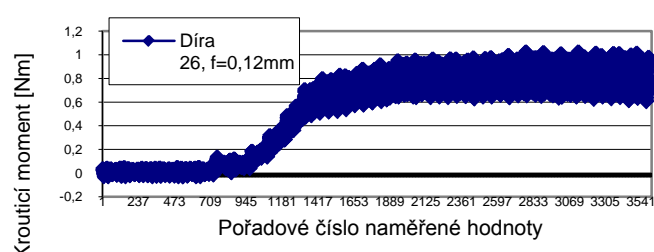
**Krouticí moment Gühring D10,
SK - K10/K20, povlak TiAlN, gk11c2bp (prepreg)**



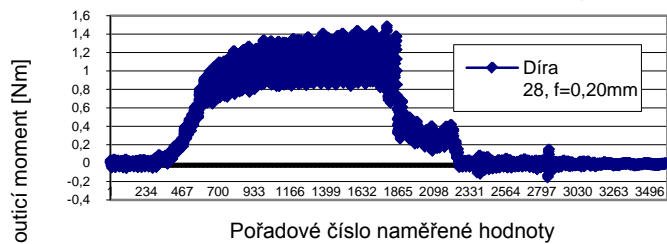
**Krouticí moment Gühring D10,
SK - K10/K20, povlak TiAlN, gk11c3cp (prepreg)**



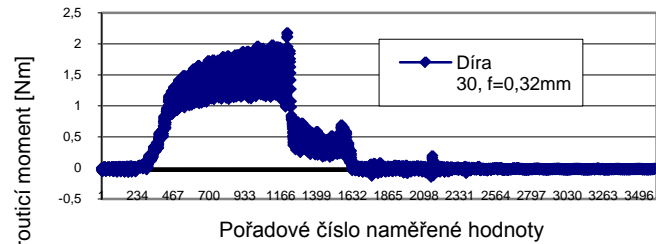
**Krouticí moment Mitsubishi D10,
SK - GP 20M, povlak TiN, mk11c1cp (prepreg)**



**Krouticí moment Mitsubishi D10,
SK - GP 20M, povlak TiN, mk11c2bp (prepreg)**

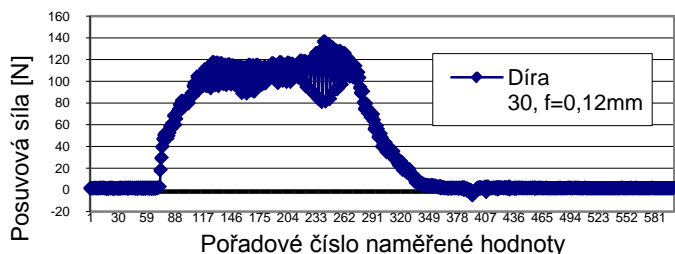


**Krouticí moment Mitsubishi D10,
SK - GP 20M, povlak TiN, mk11c3ap (prepreg)**

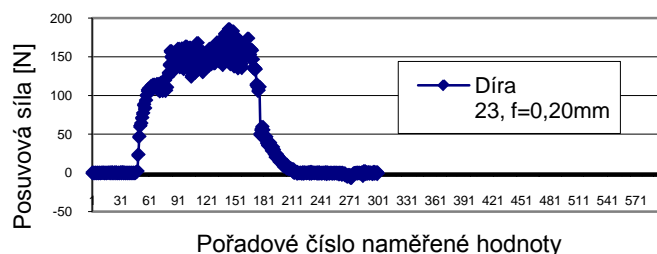


PŘÍLOHA č.2 - Grafické závislosti posuvových sil a krouticích momentů na čase (kompozit)

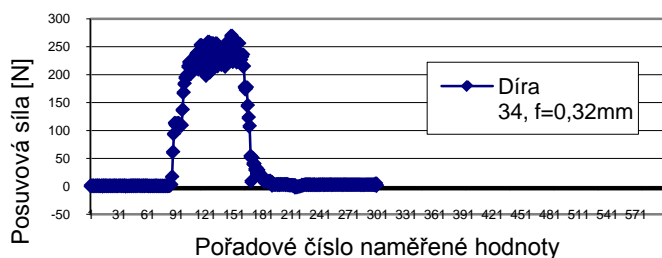
**Posuvová síla Gühring D10,
SK - K10/K20, povlak TiAlN, gk11c1d (kompozit)**



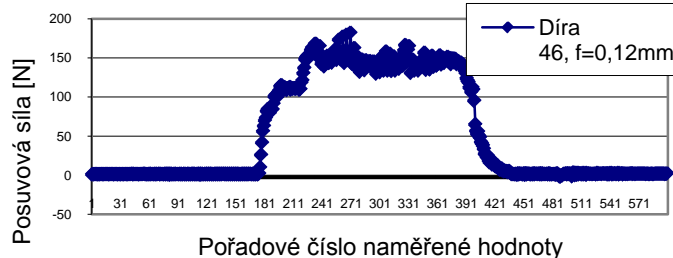
**Posuvová síla Gühring D10,
SK - K10/K20, povlak TiAlN, gk11c2e (kompozit)**



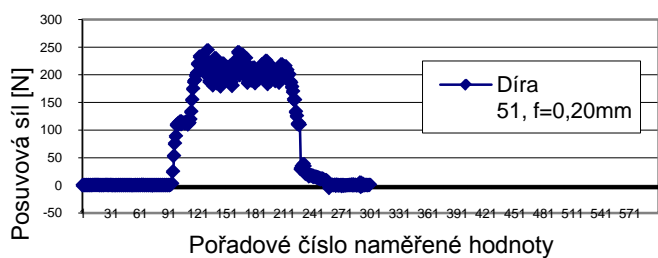
**Posuvová síla Gühring D10,
SK - K10/K20, povlak TiAlN, gk11c3a (kompozit)**



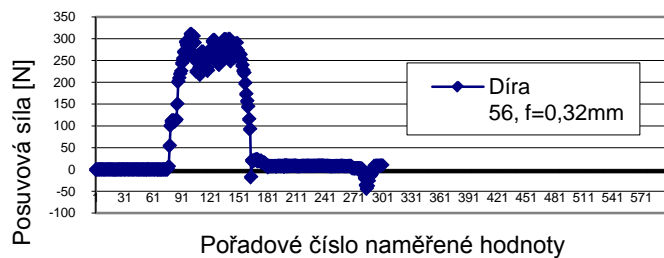
**Posuvová síla Mitsubishi D10,
SK - GP 20M, povlak TiN, mk11c1f (kompozit)**



**Posuvová síla Mitsubishi D10,
SK - GP 20M, povlak TiN, mk11c2d (kompozit)**

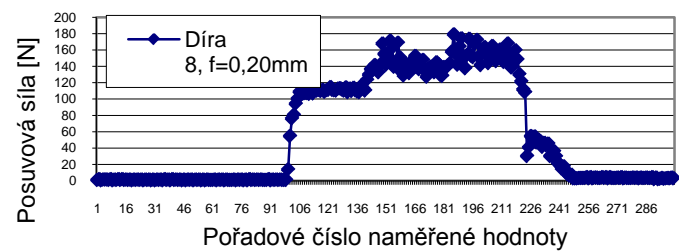


**Posuvová síla Mitsubishi D10,
SK - GP 20M, povlak TiN, mk11c1f (kompozit)**

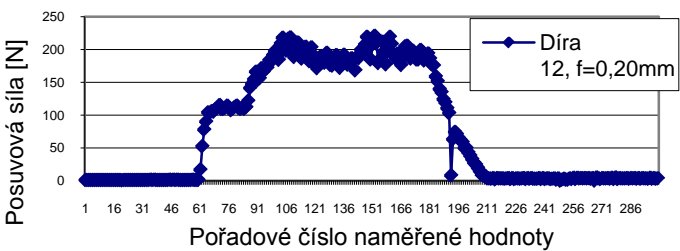


PŘÍLOHA č.2 - pokračování

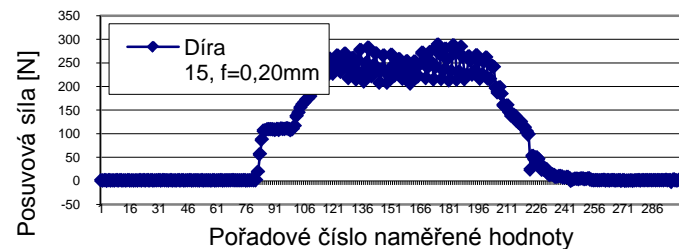
Posuvová síla Gúhring D10,
HSS, povlak TiN, go11c2a (kompozit)



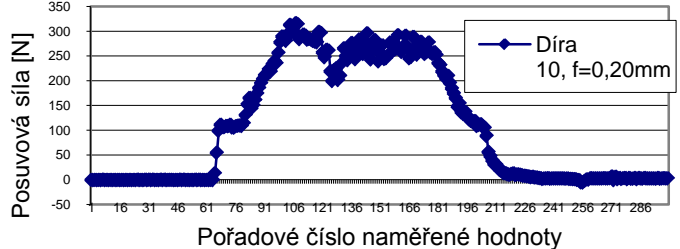
Posuvová síla Gúhring D10,
HSS, povlak TiN, go11c2c (kompozit)



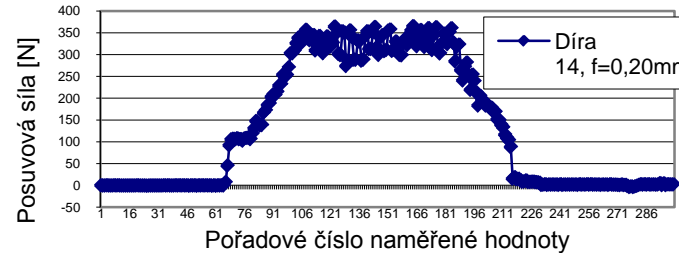
Posuvová síla Gúhring D10,
HSS, povlak TiN, go11c2f (kompozit)



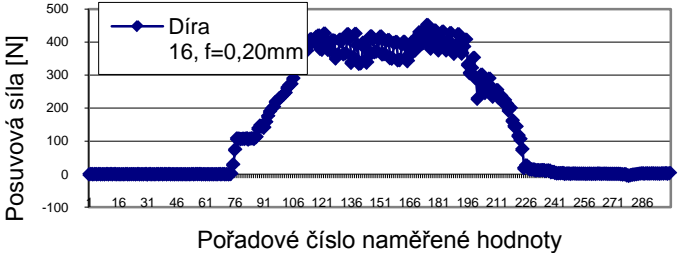
Posuvová síla Zbrojovka Vsetín D8,6,
HSS, nepovlakovaný, zod6c2b (kompozit)



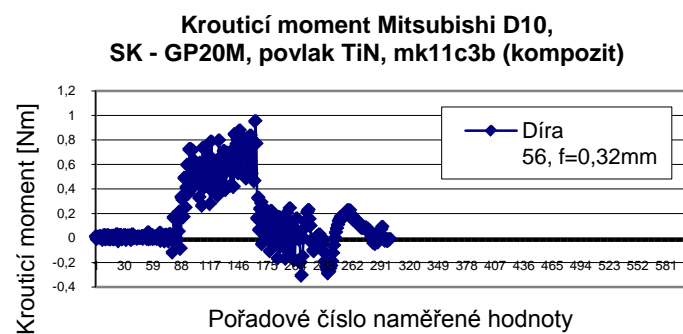
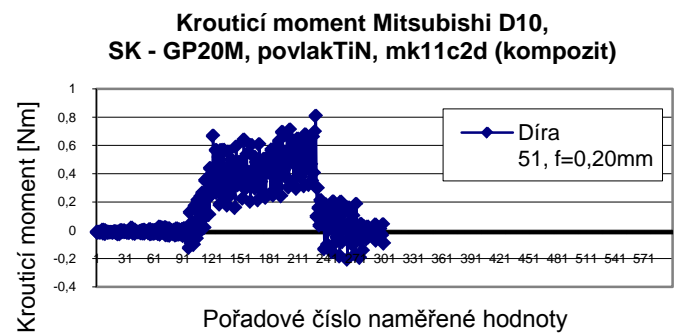
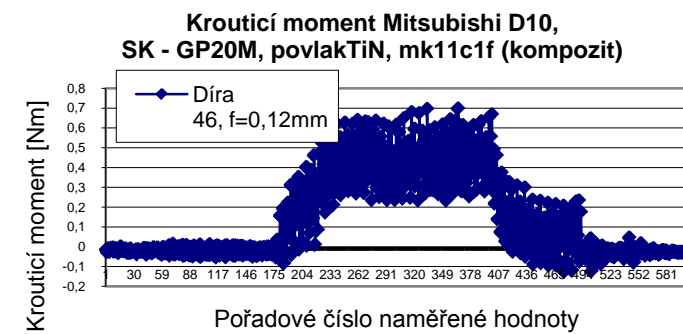
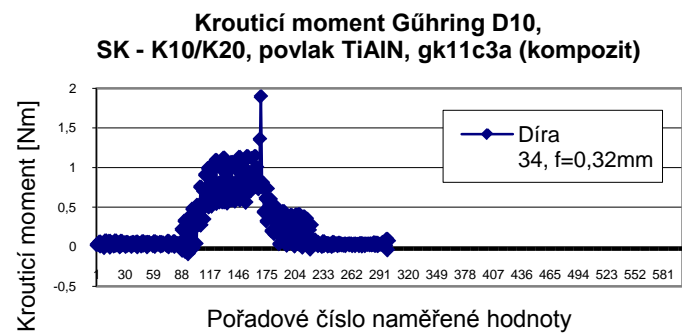
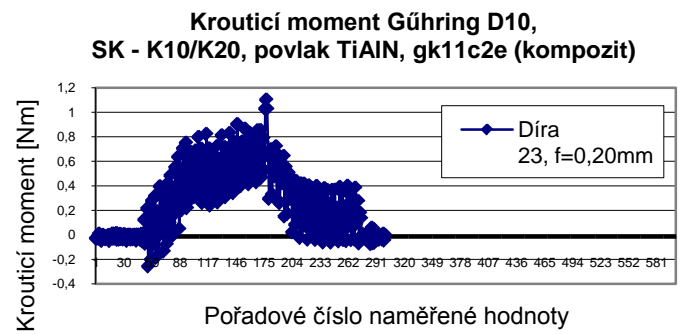
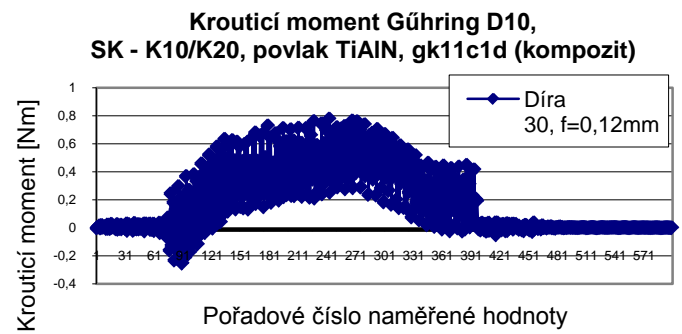
Posuvová síla Zbrojovka Vsetín D8,6,
HSS, nepovlakovaný, zod6c2d (kompozit)



Posuvová síla Zbrojovka Vsetín D8,6,
HSS, nepovlakovaný, zod6c2f (kompozit)

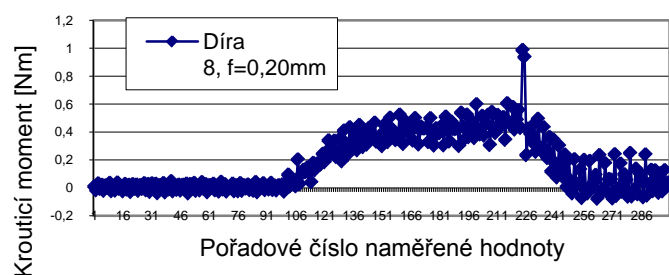


PŘÍLOHA č.2 - pokračování

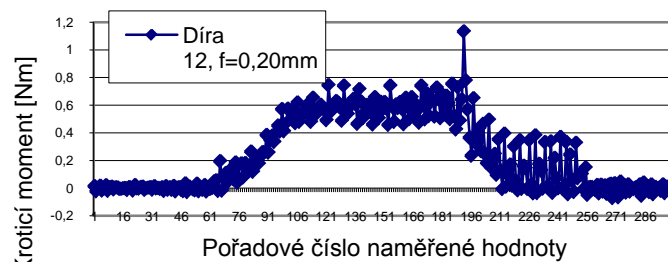


PŘÍLOHA č.2 - pokračování

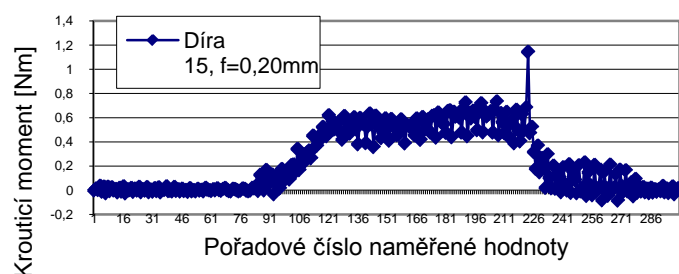
**Krouticí moment Gühring D10,
HSS, povlak TiN, go11c2a (kompozit)**



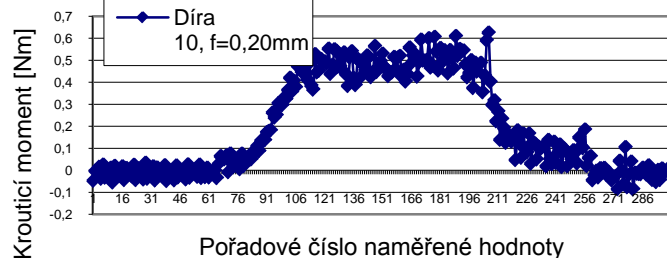
**Krouticí moment Gühring D10,
HSS, povlak TiN, go11c2c (kompozit)**



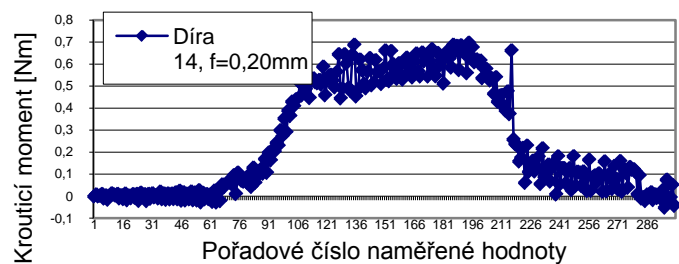
**Krouticí moment Gühring D10,
HSS, povlak TiN, go11c2f (kompozit)**



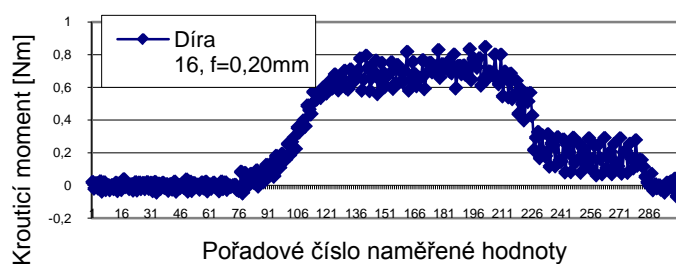
**Krouticí moment Zbrojovka Vsetín D8,6,
HSS, nepovlakovaný, zod6c2b (kompozit)**



**Krouticí moment Zbrojovka Vsetín D8,6,
HSS, nepovlakovaný, zod6c2d (kompozit)**



**Krouticí moment Zbrojovka Vsetín D8,6,
HSS, nepovlakovaný, zod6c2f (kompozit)**



Vrták Gühring, HSS, povlak TiN							
průměr D = 10 mm		otáčky $n = 1120 \text{ min}^{-1}$		řezná rychlost $v_c = 35,2 \text{ m min}^{-1}$		posuv na otáčku $f = 0,20 \text{ mm}$	
Díra číslo	Posuvová síla F_f [N]		Krouticí moment [Nm]		VB [mm]		
	Rozsah	Střed	Rozsah	Střed	1.břit	2.břit	Střed
1	118 - 175	142	0,32 - 0,55	0,44	0,07	0,08	0,08
5	175 - 257	211	0,38 - 0,68	0,51	0,20	0,19	0,20
10	235 - 365	303	0,45 - 0,78	0,62	0,66	0,60	0,63
15	176 - 488	381	0,47 - 0,95	0,70	0,75	0,65	0,70
20	395 - 610	517	0,61 - 1,04	0,85	0,81	0,81	0,81
25	464 - 740	616	0,58 - 1,01	0,83	0,88	0,92	0,90
30	554 - 822	698	0,61 - 1,14	0,91	0,93	0,96	0,95
35	651 - 883	788	0,70 - 1,18	0,92	1,02	1,01	1,02
40	718 - 950	853	0,70 - 1,23	0,97	1,04	1,03	1,04

U díry číslo 30 došlo ke kmitání soustavy; u díry číslo 35 došlo k delaminaci materiálu

Vrták Zbrojovka Vsetín, HSS, nepovlakovaný							
průměr D = 8,6mm		otáčky n = 1120 min ⁻¹		posuvová rychlost v _c = 31,7 m min ⁻¹		posuv na otáčku f = 0,20 mm	
Díra číslo	Posuvová síla F _f [N]		Krouticí moment [Nm]		VB [mm]		
	Rozsah	Střed	Rozsah	Střed	1.břit	2.břit	Střed
1	128 - 198	169	0,23 - 0,55	0,43	0,20	0,17	0,19
5	197 - 304	248	0,42 - 0,78	0,61	0,39	0,37	0,38
10	274 - 414	347	0,50 - 0,83	0,66	0,54	0,56	0,55
15	340 - 529	443	0,60 - 1,03	0,77	0,63	0,66	0,65
20	451 - 626	542	0,62 - 1,04	0,80	0,73	0,81	0,77
25	600 - 750	676	0,59 - 1,15	0,90	0,96	0,95	0,96
30	680 - 820	764	0,69 - 1,16	0,91	1,03	1,13	1,08
35	860 - 910	866	0,78 - 1,03	0,90	1,08	1,38	1,23
40	800 - 950	870	0,69 - 1,21	0,97	1,15	1,51	1,33
U díry číslo 25 došlo ke kmitání soustavy							

Vrták Gühring, SK - K10/K20, povlak TiAlN							
průměr D = 10 mm		otáčky n = 1800 min ⁻¹		řezná rychlost v _c = 56,5 m min ⁻¹		posuv na otáčku f = 0,20 mm	
Díra číslo	Posuvová síla F _f [N]		Krouticí moment [Nm]		VB [mm]		
	Rozsah	Střed	Rozsah	Střed	1.břit	2.břit	Střed
1	90 - 150	127	0,43 - 0,57	0,52	-	0,09	0,09
10	148 - 179	160	0,25 - 0,54	0,41	0,08	0,10	0,09
20	149 - 171	156	0,39 - 0,61	0,51	0,08	0,11	0,10
30	138 - 159	149	0,46 - 0,69	0,56	0,09	0,12	0,11
50	139 - 161	150	0,43 - 0,68	0,55	0,11	0,12	0,12
80	110 - 169	152	0,41 - 0,68	0,53	0,11	0,12	0,12
101	138 - 165	150	0,44 - 0,67	0,56	0,12	0,12	0,12
150	138 - 169	154	0,43 - 0,68	0,55	0,12	0,12	0,12
200	139 - 180	158	0,49 - 0,75	0,63	0,12	0,12	0,12
U díry číslo 1 došlo u 1. břitu k odloupenutí povlaku							